

Automatische Titration und pH-Regelung

von

GERTRAUD RIFFESER

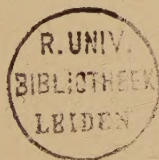
Aus dem Physiolog.-Chem. Institut der Universität München

Direktor: Prof. Dr. A. Butenandt

Automatische Titration und pH - Regelung

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
verfaßt und einer Hohen Medizinischen Fakultät der
Ludwig - Maximilians - Universität zu München



vorgelegt von
Gertraud Riffeser
aus
München

1958

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Referent: Prof. Dr. H. Niemer
Correferent: Prof. Dr. A. Butenandt
Dekan: Prof. Dr. W. Büngeler

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juli 1958

MEINEN ELTERN

Inhaltsverzeichnis

	Seite
<u>EINLEITUNG</u>	4
Über Titration und pH-Messung	4
<u>AUTOMATISCHE TITRATION</u>	9
Geräte zur automatischen Titration	9
Elektrotitriergerät, das am Titrationsendpunkt selbstständig abschaltet	
Gerät zur Elektrotitration mit automatischer Registrierung	
Rechnerische Bestimmung des Titrationsendpunktes	
Anordnung zum Ausschalten an einem bestimmten Endpunkt bei der automatischen Titration	
Unterbrecher für automatische Titrationsen	
Beckman - Titrator	
<u>DIE PH - REGELUNG</u>	18
Grundlagen der Regeltechnik	18
Der Regelkreis	23
Die Regelstrecke	25
Arten der Regelstrecken	
Kenngrößen der Regelstrecken	
Bedeutung der Art einer Regelstrecke	
Eigenheiten der pH - Regelstrecke	
Der Regler	34
Einteilung der Regler	
Die Einzelteile eines Reglers	
Kenngrößen eines Reglers	
Besondere, bei diskontinuierlich wirkenden Reglern vorkommende Begriffe	
Verschiedene Reglertypen	46
Stetig wirkende Regler	
Der geschlossene Regelkreis mit stetig wirkenden Reglern	
Stabilitätsfragen	
Regelschwingungen	
Rückführung	
Nicht - lineare Regelkreisglieder	
Untersuchung der Eigenschaften eines Regelkreises	81

Geräte zur automatischen
pH - Regelung

83

Der Fallbügelregler von Hartmann & Braun
Elektroanalytisches Vielzweckgerät von Lingane
Registrierendes Autotitrationsgerät von Jacobsen
und Leonis
pH - Regler für die Abwasserbeseitigung der
Firma Beckman
Strahlrohrregler der Askaniawerke
Regelux 3 von Hartmann & Braun
pH - Regler nach Meyer

ZUSAMMENFASSUNG

112

AUTORENVERZEICHNIS

114

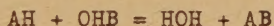
EINLEITUNG

Über Titration und pH - Messung

Grundlagen der Titration

Die Titration ist eine Methode um bestimmte, in einer Lösung enthaltene Ionen quantitativ zu erfassen.

So wird z. B. die unbekannte Wasserstoffionenkonzentration einer Flüssigkeit ermittelt, indem man eine nach Volumen und Konzentration genau definierte Lauge auf die Lösung einwirken läßt. In dem Säure - Laugen - Gemisch spielt sich dann eine Reaktion ab nach der Gleichung:



wobei AH = Säuremolekül, OH⁻ = Laugenmolekül,

AB = Salz-molekül, H₂O = Wassermolekül.

Hat jedes Säuremolekül seine Wasserstoffionen vollständig an ein Basenmolekül abgegeben, so ist der Titrationsendpunkt erreicht. Die ermittelte Acidität heißt "Titrationsacidität".

Mit Hilfe der Titration wird also die Kapazität einer Flüssigkeit für eine bestimmte Ionenart, hier die Wasserstoffionen, bestimmt; das ist jedoch nicht gleichzusetzen mit neutraler Reaktion des Gemisches!

Die Titrationsendpunktsbestimmung

Will man eine Säure mit einer Lauge titrieren, so fügt man die Lauge in kleinen Portionen der Säure zu. Dabei ändert sich ständig die Konzentration der freien Wasserstoffionen in der Säure, und zwar mit wachsender Geschwindigkeit, je näher man dem Titrationsendpunkt kommt. Dieser endlich ist durch eine fast sprunghafte Verschiebung der Konzentration der freien Ionen gekennzeichnet.

Den "Ionensturz" kann man mit Hilfe verschiedener Methoden feststellen. Besonders genau ist der elektrometrische Weg.

Die elektrometrische Titration

Taucht man in eine Flüssigkeit, die einen Elektrolyten gelöst enthält einen metallischen Körper, so bildet sich an der Oberfläche dieser sogenannten "Meßelektrode" ein bestimmtes elektrisches Potential, das man ableiten kann. Die Größe des "Meßpotentials" erhält man durch den Vergleich mit einem "Bezugspotential", das sich in einer Elektrolytlösung bekannter Konzentration an der Oberfläche der "Bezugselektrode" bildet.

Um die Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden sichtbar zu machen, werden die Elektrolytlösungen, sowie die Elektroden, über ein Voltmeter zu einem Stromkreis verbunden. Nach der Nernst'schen Formel ist die angezeigte Potentialdifferenz proportional zur Ionenkonzentration der Meßlösung.

Die genauesten Meßergebnisse erhält man bei Verwendung der Nernst'schen Konzentrationskette. Hierbei bestehen Meß- und Bezugselektrode aus dem gleichen Material; sie enthalten die gleichen Ionen, die in der Meßlösung gemessen werden sollen. Meß- und Bezugslösung unterscheiden sich nur durch die Konzentration, nicht durch die Art der in ihnen gelösten Ionen.

Den Titrationsendpunkt erkennt man bei der elektrometrischen Methode an einer fast sprunghaften Potentialänderung, entsprechend der plötzlichen Ionenverschiebung in der Meßlösung an diesem Punkt.

Die elektrometrische Methode ist bei Verwendung entsprechender Konzentrationsketten für die Titration aller Ionenarten verwendbar und beschränkt sich nicht nur auf die Titration von H^+ - und OH^- -Ionen!

Eigenheiten der elektrometrischen Titration gegenüber der pH - Regelung

Bei der Titration kommt es nur auf die genaue Bestimmung des Titrationsendpunktes an, nicht so sehr auf die Kenntnis der Ionenkonzentration zu jedem Zeitpunkt des Titrationsvorganges. Der Endpunkt ist dabei in jedem Fall durch einen sehr deutlichen Potentialsprung gekennzeichnet. Aus diesem Grund ist die Titration gegenüber der pH - Regelung relativ einfach, besonders empfindliche Meßgeräte sind nicht erforderlich, Fehlerquellen bei der Potentialbildung fallen kaum ins Gewicht.

Fehlerquellen bei der elektrometrischen Ionenkonzentrationsmessung, insbesondere der Wasserstoffionenkonzentrationsmessung.

Die Größe des Elektrodenpotentials hängt ab von:

1. der Zusammensetzung der Lösung,
2. der Natur der Elektrode,
3. der Temperatur.

Ändert sich einer der drei Faktoren während einer Messung für 1 Elektrode, so vergrößert oder verkleinert sich die gemessene Potentialdifferenz unabhängig von der in der Meßlösung herrschenden Ionenkonzentration.

Die Polarisation

Der bei der Potentialmessung fließende Strom ruft an den Elektroden Polarisationserscheinungen hervor. Sie schwächen die EMK der Meßanordnung. Um trotzdem gute Meßergebnisse zu erhalten, trachtet man die Polarisation zu verringern:

1. durch Rührvorrichtungen in der Meßflüssigkeit,
2. durch Verminderung des Meßstromes etwa nach der Kompensationsmethode und
3. indem man den Meßstrom nicht länger fließen läßt, als unbedingt erforderlich ist.

Der Konzentrationsausgleich

Auch der Konzentrationsausgleich zwischen Meß- und Bezugslösung verringert die EMK der Kette. Ihm begegnet man wie der Polarisation.

Die Diffusionspotentiale

An der Berührungsstelle zwischen Meß- und Bezugslösung entsteht nicht nur ein Konzentrationsausgleich, sondern auch ein sogenanntes "Diffusionspotential", bedingt durch die verschiedenen Wanderungsgeschwindigkeiten der einzelnen Ionen der Elektrolytlösungen. Das Diffusionspotential wächst mit dem Unterschied der Wanderungsgeschwindigkeiten der einzelnen Ionen des Elektrolyten.

Dieser Fehler wird fast völlig beseitigt, wenn man Kaliumchlorid in hoher Konzentration zwischen Meß- und Bezugslösung schaltet, da Kalium und Chlor beinahe die gleichen Wanderungsgeschwindigkeiten haben.

Weitere Fehlerquellen

Weitere Fehlerquellen, aber praktisch von geringerer Bedeutung, sind die Phasengrenzpotentiale, die Polarisationserscheinungen an Phasengrenzflächen und die Membranpotentiale.

Die pH - Messung

Die pH - Messung soll, im Gegensatz zur Titration, nur die nach dem Massenwirkungsgesetz dissoziierten Wasserstoffionen einer Flüssigkeit erfassen. Sie gibt das Maß für die sauren und basischen Eigenschaften der Flüssigkeiten.

Eine möglichst fehlerfreie Potentialbildung an den Elektroden ist für solche Messungen absolute Vorbedingung. Aus diesem Grund muß auf die Wahl der Elektroden besonders geachtet werden.

Die genauesten Werte erhält man auch heute noch mit der Wasserstoffelektrode, doch ist sie für die Praxis zu umständlich zu handhaben.

Bei der Chinhydronelektrode handelt es sich um eine Abart der Wasserstoffelektrode. Auch sie ist für schnell hintereinander erfolgende Messungen nicht ideal.

Auch die Antimonelektroden werden heute kaum mehr verwendet, besonders wegen ihrer starken Irritierbarkeit durch Alkalien.

Für praktische Versuche am geeignetsten ist heute wohl die Glaselektrode, die dem Verwendungszweck entsprechend aus verschiedenen Glassorten hergestellt wird. Schwierigkeiten, die früher der hohe Ohmsche Widerstand der Elektroden bereitete, werden heute durch die Verwendung besonders empfindlicher Meßinstrumente umgangen. Außerdem gelang es, relativ niederohmige Glassorten herzustellen.

Als Bezugselektroden werden meist die Wasserstoff- und die Kalomelektrode verwendet.

Das Elektrodenpotential ändert sich für die meisten Elektroden weitgehend linear proportional zum pH. Nur in stark alkal und

stark sauren Gebieten (über pH 9 und unter pH 2) werden die Fehlerquellen so groß, daß man mit Spezialelektroden arbeiten muß.

Für die Praxis kann man also die Skala eines mV - Meters direkt in pH eichen. Dabei muß beachtet werden, daß bei Verwendung verschiedener Elektroden und Bezugssysteme die mV Zahl, die einer pH - Änderung um 1 entspricht, wechselt. (1)

AUTOMATISCHE TITRATION

Geräte zur automatischen Titration

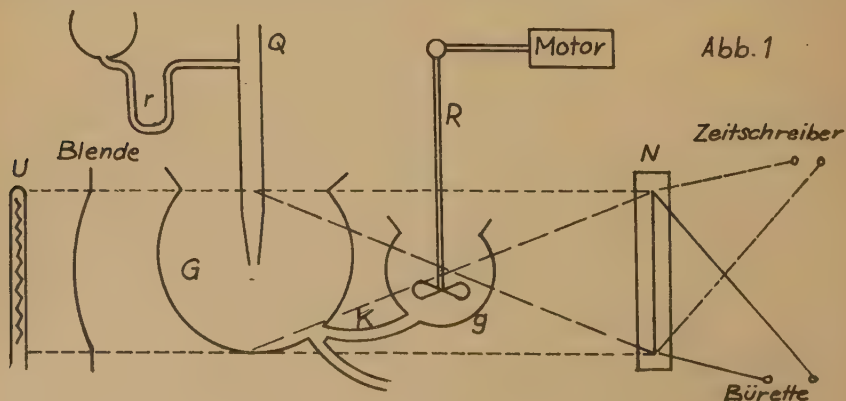
Durch die Titration wird, wie bereits festgestellt wurde, die Kapazität einer Flüssigkeit in Bezug auf eine bestimmte Ionenart festgestellt. Der Titrationsendpunkt ist dabei erkennbar:

1. am Farbumschlag eines zugesetzten Indikators,
2. an einem deutlichen Potentialsprung bei stetiger Messung der EMK mit einer entsprechenden Konzentrationskette.

Lange Zeit war es üblich, von Hand so lange Reagens aus der Bürette der Meßlösung zuzusetzen, bis man am Auftreten eines der beiden beschriebenen Anzeichen den Endpunkt der Titration erkannte und die Zufuhr von weiterem Reagens abspernte. Nun aber wurden Geräte ausgearbeitet, die die plötzliche Farbänderung oder den Potentialsprung benützen, um einen elektrischen Stromkreis zu schließen, der seinerseits die Reagenszufuhr aus der Bürette automatisch abspernt.

Elektrotitriergerät, das am Titrationsendpunkt selbständig abschaltet (2)

HICKMAN und SANDFORD gaben diese Methode an, bei der das Titriergefäß aus zwei Teilen, dem linsenförmigen Hauptgefäß G und dem seitlich davon angeordneten Gefäß g mit dem Rührer R besteht.



Beide sind miteinander durch das Rohr K verbunden. Die Titration wird gesteuert und kontrolliert durch eine 100 Watt Projektionslampe U, sowie durch eine Photozelle N.

Die Meßlösung fließt aus einem Vorratsgefäß über ein Heberrohr Q in die beiden Meßgefäße. Dabei saugt sie über einen Rohransatz r Indikatorflüssigkeit an.

Das linsenförmige Gefäß G ist so angeordnet, daß, aber erst wenn es voll gefüllt ist, der Lichtstrahl der Projektionslampe U auf die Photozelle konzentriert wird. Dadurch entsteht ein Photostrom der den Zufluß von Normallösung aus der Bürette (nicht gezeichnet) bewirkt.

Ist die Titration beendet, so wird durch das plötzliche Auftreten der Indikatorfarbe der Photostrom so geschwächt, daß seine EMK zu gering ist, um die Bürette offen zu halten. Der Zufluß der Reagenslösung wird gestoppt.

Mit dem Öffnen der Bürette kann das Abfließen eines Zeitschreibers gekoppelt sein. Er registriert die Menge der zugeflossenen Normallösung vom Beginn der Reaktion bis zu ihrem Endpunkt.

Hickman und Sandford koppelten mit der Anlage noch einen automatischen Entleerungsmechanismus für das Meßgefäß.

Gerät zur Elektrotitration mit automatischer Registrierung (3)

KORDATZKI beschrieb ein Titriergerät mit folgendem Prinzip: Der Zeiger eines pH - messenden Volt - oder Amperemeters wird durch einen Fallbügel in kurzen Zeitabständen auf eine rotierende Trommel niedergedrückt. Dort zeichnet er durch einen Punkt seine jeweilige Stellung auf. Mit der Trommelbewegung gekoppelt ist ein Eintauchstab, der aus einem Überlaufgefäß in gleichen Zeiträumen gleiche Flüssigkeitsmengen verdrängt. Die Flüssigkeit wird dabei von Reagenslösung gebildet, die man in die pH - Meßlösung einfließen läßt.

Die Koppelung Trommel - Eintauchstab kann hergestellt sein:

1. durch ein Band, das mit dem Tauchstab verbunden ist und sich

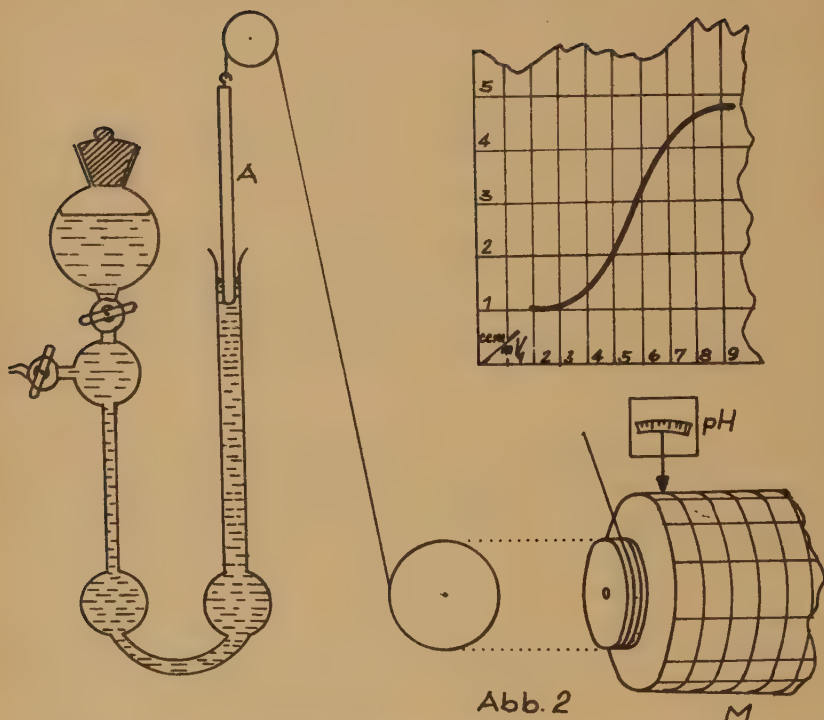


Abb. 2

von einer mit der Trommelachse verbundenen Scheibe abwickelt (man muß dazu ein nicht dehnbares, wenig feuchtigkeitsempfindliches Material nehmen),

2. durch eine Zahnstange, die am oberen Ende mit dem Eintauchkörper fest verbunden ist und an entsprechender Stelle in ein Zahnrad auf der Trommelachse eingreift. Bei Einbau mehrerer Übersetzungen kann man die Titrationskurve in verschiedenen Maßstäben aufzeichnen. Mit der Achse der Registriertrommel kann man auch gleichzeitig mehrere Tauchkörper verbinden und unter Verwendung der Trommel als Vielfachsreiber gleichzeitig mehrere Titrationen durchführen.

Den Äquivalenzpunkt der Titration erkennt man am Wendepunkt der aufgezeichneten Kurve, die als Koordinaten das Volumen der zugegebenen Reagenslösung und den dazu gehörigen pH - Wert hat.

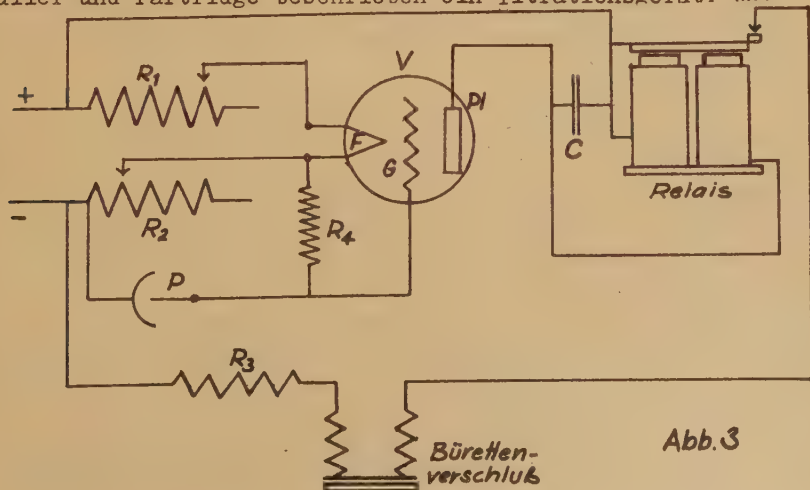
Rechnerische Bestimmung des Titrationsendpunktes (4)

Genauer noch als das Ablesen des Titrationsendpunktes aus einer aufgezeichneten Kurve ist seine Berechnung nach Erich Müller. Der Autor titriert in der Nähe des Umschlagpunktes nur noch mit kleinen Portionen gleicher Volumina der Titrationslösung und bestimmt die dazugehörigen kompensierenden Ohm auf der Skala eines Regulierwiderstandes nach der Poggendorfsmethode. Dann stellt er eine Funktion für die ermittelten Ohmwerte in Abhängigkeit von dem Verbrauch an Titrationslösung auf. Damit hat man die sogenannte Titrationskurvengleichung. Das Maximum des Differenzialquotienten dieser Funktion ist maßgebend für die Berechnung des Äquivalenzpunktes.

Eine Anordnung zum Ausschalten an einem bestimmten Endpunkt bei der elektrometrischen Titration wurde von W. E. Shenk und F. Fenwick (5) beschrieben. Hier wird die plötzliche Änderung der Potentialdifferenz zwischen zwei ungleichartigen Metallelektroden im Endpunkt der potentiometrischen Titration verwendet, um den Zufluß aus der Bürette abzustellen. Shenk und Fenwick benutzten Platin - Wolfram Elektroden.

Die Verwendung der Photozelle zur automatischen Titration (6)

Müller und Partridge beschrieben ein Titrationsgerät, bei dem die



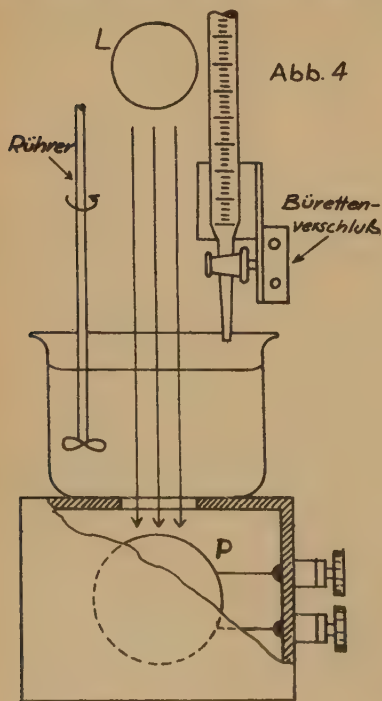
Farbänderung eines Indikators benutzt wird, um einen Photostrom zu erzeugen und dadurch einen Bürettenverschluß zu öffnen bzw. zu schließen. Das Gerät arbeitet wie folgt:

Gleichstrom von 110 V aus dem Netz macht Batterien in der Anordnung unnötig. R_1 und R_2 sind Widerstände, die so eingestellt werden, daß über dem Heizfaden ein geeigneter Spannungsabfall auftritt und daß 90 Volt Anodenspannung entstehen. Die Vakuumröhre sollte bei dieser Anodenspannung einen Anodenstrom von wenigstens 4 Milliampere erzeugen.

Hinter die Röhre ist ein Bunnell-Standard-Telegraphenrelais geschaltet, das auf wenige Milliampere schon anspricht. Es hat einen Widerstand von 3000 Ohm. Zwischen Heizfaden und Röhrengitter liegt eine Photozelle; parallel zu ihr befindet sich noch vor dem Gitter ein Widerstand R_4 von etwa 5 Megohm.

Die normale Stromstärke der Röhre reicht aus, das Relais geschlossen zu halten. Belichtet man die Photozelle P, so wird das Gitter

G negativ, die Anodenstromstärke nimmt ab und das Relais öffnet sich. Dabei schließt es einen Stromkreis, der vom Netz abzweigt, über einen Schutzwiderstand R_3 zum Bürettenverschluß führt und über das Relais wieder zum Netz führt. Der Kondensator C wird bei Arbeiten mit Wechselstrom verwendet.



Zur Titration wird das Becherglas mit indikatorversetzter Meßlösung in den Strahlengang zwischen die Lichtquelle L und die Photozelle gebracht. Mit der Indikatorfarbe ändert sich der Photostrom und beeinflusst über die Elektronenröhre Relais und Bürettenverschluß.

Zunächst füllt man das Becherglas mit destilliertem Wasser, stellt

es in den Strahlengang und regelt die Lichtintensität der Lampe L durch einen Regulierwiderstand derart ein, daß sich das Relais gerade eben öffnet.

Nun wird das Glas mit der indikatorgefärbten Meßlösung versehen und zwischen Lampe und Photozelle gebracht. Das Relais schließt sich. Ist der Bürettenverschluß dabei geöffnet, so schreitet die Titration fort, bis das letzte Bißchen Farbe verschwunden ist. Nun öffnet sich das Relais, der Stromkreis zwischen Netz und Bürettenventil schließt sich und die Reagenszufuhr zur Meßlösung hört auf.

Verwendet man umgekehrt den Netzstrom dazu, den Bürettenverschluß offen zu halten, so kann man damit farblose Flüssigkeiten bis zum Auftreten einer Färbung titrieren.

Zu jeder Titration wird am besten ein Indikator verwendet, der gegen den Titrationsendpunkt zu möglichst ausgeprägte Helligkeitsunterschiede zeigt. Das läßt sich prüfen, indem man bei konstanter Lichtquelle den Anodenstrom der Elektronenröhre für die basische, sowie die saure Farbe eines Indikators mißt. Die Potentialdifferenz zwischen beiden zeigt dann, wie empfindlich ein Relais sein muß, um auf die Farbunterschiede anzusprechen.

Der Bürettenverschluß. Der einfachste Bürettenverschluß besteht aus einem Gummirohr, das Bürettenspitze und geeichten Reagensbehälter miteinander verbindet und durch eine beschwerte Klemme zugequetscht werden kann. Das Gewicht auf der Klemme wird normalerweise von einem Elektromagneten getragen. Bekommt der Magnet über das Relais Netzstromzufuhr, so läßt er das Gewicht fallen und das Gummirohr wird abgeklemmt; der Reagensaustritt aus der Bürette hört auf.

Ein festerer und dauerhafterer Verschluß der Bürette ist in der Zeichnung angegeben. Dazu werden gewöhnliche Elektromagneten verwendet. An ihrem Anker ist ein Bolzen P angelötet, der mit seinem freien Ende den Hebel L trägt. Dieser Hebel ist fest verbunden mit einem Hohteil C, der den Glaskopf des Bürettenhahns umgreift

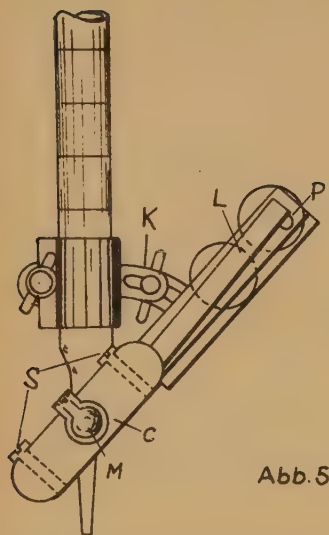
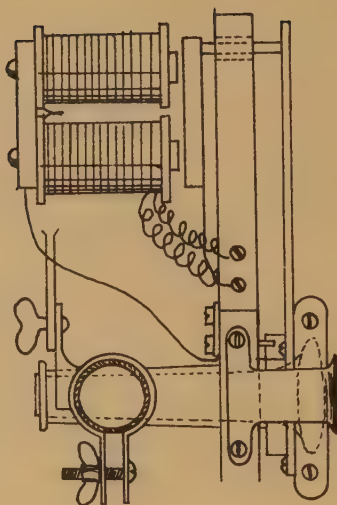


Abb. 5



und mit Hilfe von Schrauben S an ihm befestigt ist. Hohlteil C und Hebel L drehen sich mit dem Bürettenverschluß. Dieser Bewegung wirkt die Kraft einer Spiralfeder H entgegen. Ein Metallfinger M

hindert den Bürettenhahn daran, aus seinem Schliff herauszurutschen.

Der Träger der Elektromagneten ist etwas über dem Öffnungshahn an der Bürette befestigt. Durch die Stellschraube K kann man die Winkelstellung der Elektromagneten zur Bürettenachse verändern. Von diesem Winkel ist die Öffnung der Bürette abhängig.

Fließt durch den Magneten ein Strom, so wird der Anker angezogen, und zwar dreht er sich dem Neigungswinkel des Elektromagneten zur Bürettenachse entsprechend. Die mit ihm starr verbundenen Hebel H, Hohlteil C und Bürettenhahn folgen dieser Bewegung, bis die Spiralfeder H Einhalt gebietet. Je nach der Ausgangsstellung des Bürettenhahns ist nun die Bürette geöffnet oder geschlossen.

Unterbrecher für automatische Titrationsen (7)

Lingane beschrieb eine Doppeltriiodenschaltung, die bei einem bestimmten vorgegebenen Potential einen Stromkreis unterbricht und bei einem nur wenig geringeren Potential wieder einschaltet. Die Wirkungsweise des Apparates ist wohl am besten aus der Abbildung 6 zu ersehen.

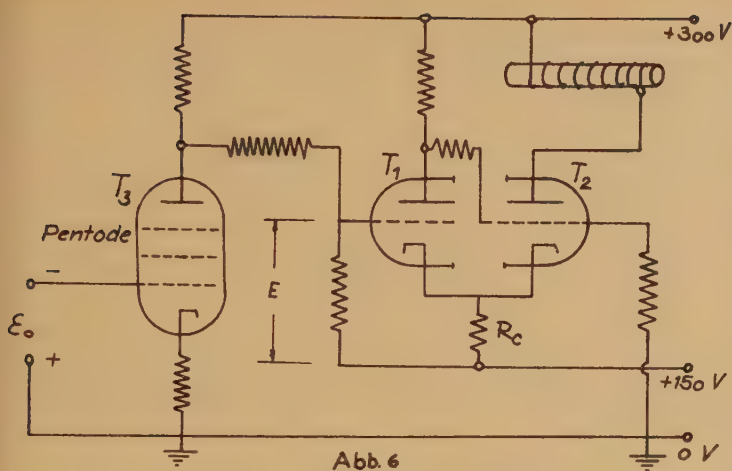


Abb. 6

Die Triode T_2 hat im Anodenkreis ein Relais. Das Gitter von T_2 ist über einen Widerstand mit der Anode von T_1 und andererseits über einen Widerstand mit der Er-

de verbunden. Der gemeinsame Kathodenwiderstand R_c ist an einen Punkt geführt, der 150 V gegen die Erde hat. Die gemeinsame Anodenspannung beträgt + 300 V gegen die Erde.

Im Ruhezustand liegt auf T_1 keine Eingangsspannung. Dieser Röhrenteil führt also keinen Strom, während T_2 voll stromführend ist.

Wird das Gitter von T_1 stärker positiv, so sinkt das Anodenpotential, das Gitter T_2 wird negativ. Dadurch entsteht in T_2 ein Stromabfall, der einen verminderten Spannungsabfall über R_c zur Folge hat. Dies aber wirkt wieder zurück auf T_1 , die noch stärker positiv wird, bis endlich der Stromfluß in T_2 völlig gesperrt ist.

Bei der automatischen Titration steuert das Gerät eine Spritzbürette mit einem Eingangswiderstand von 5 Megohm. Da dieser Widerstand für Glaselektroden nicht genügt, muß eventuell eine Widerstandsabgleichstufe verwendet werden.

Das Eingangspotential der Pentode T_3 , die mit dem Gitter T_1 verbunden ist, wird auf etwa 150 V gegen die Erde gebracht. (Größenordnung des Gitterpotentials von T_1 im nicht unterbrochenen Zustand).

Lingane gibt die Empfindlichkeit seines Gerätes mit + 3 mV an. Zur Speisung des Apparates verwendet er Strom aus einem Transformator für konstante Spannung.

Der Beckman - Titrator (8)

Die meisten Titriergeräte sind nur fähig, einen Titrationsvorgang automatisch auszuschalten. Die Firma Beckman stellt jedoch ein Gerät her, das völlig selbständig auch die Titration beginnt.

Ist das Meßgefäß mit Meßlösung gefüllt und in eine bestimmte Ausgangsposition gebracht, so läuft automatisch ein Rührwerk an und ein Bürettenventil öffnet sich. Nähert sich die Titration ihrem Endpunkt, so schaltet sich selbständig ein Stromkreis ein, der den Zufluß des Reagens verlangsamt und ihn am Endpunkt schließt.

DIE PH - REGELUNG

In Chemie und Biologie taucht seit einiger Zeit immer häufiger das Problem auf, einen bestimmten pH - Wert einzustellen und konstant zu halten. Das gilt z. B. für die Herstellung künstlicher Textilfasern genau so, wie für die Joghurtzubereitung in den Molkereien oder für das Studium einer Fermentwirksamkeit oder eines Bakterienwachstums im optimalen Milieu.

Die Regelung auf einen vorgewählten pH - Wert geschieht durch Säure- oder Laugenzufuhr zur Regelflüssigkeit bei jeder Abweichung der Wasserstoffionenkonzentration von dem gewählten Wert. Je schneller die pH - Änderung bemerkt und ausgeregelt wird, desto besser ist die Regelung. Voraussetzung für eine Regelung ist selbstverständlich die ständige und genaue Messung des pH - Wertes in der Regelflüssigkeit.

Die pH - Regelung durch eine technische Hilfskraft erfordert viel Zeit. Außerdem enthält sie zahlreiche, schwer kalkulierbare Unsicherheitsfaktoren, wie Ermüdbarkeit, Parallaxenfehler beim Ablesen der Geräte usw. Man versucht daher zu der bequemerem "automatischen" Regelung überzugehen, wie sie in der Technik zum Konstanthalten der verschiedensten Größen längst üblich ist.

Die automatische Regelung des pH - Wertes ist jedoch nicht ganz einfach. Nicht jeder in der Technik bewährte Regler kann für diese spezielle Regelaufgabe verwendet werden. Um die Schwierigkeiten zu verstehen, muß man sich zunächst mit der Regeltechnik im allgemeinen beschäftigen.

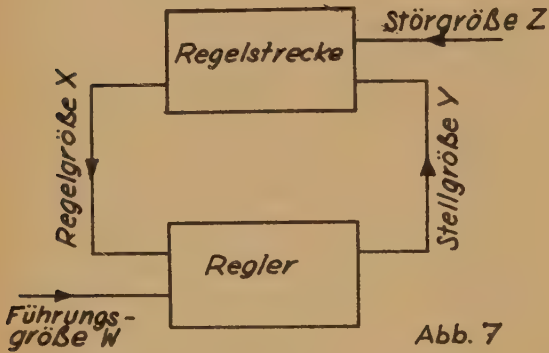
G r u n d l a g e n d e r R e g e l t e c h n i k

Regelung und Steuerung nach DIN 19226 (9)

Das Regeln (die Regelung) ist ein Vorgang, bei dem der vorgegebene Wert einer Größe fortlaufend durch Eingriff auf Grund von Messungen dieser Größe hergestellt und aufrechterhalten wird.

Hierdurch entsteht ein Wirkungsablauf, der sich in einem geschlos-

senen Kreis, dem Regelkreis, vollzieht, denn der Vorgang läuft ab auf Grund von Messungen einer Größe, die durch ihn selbst wieder beeinflusst wird.



Auf die pH - Messung übertragen ergibt sich, daß der pH - Wert ständig gemessen und auf Grund des Meßergebnisses mit Hilfe von Reagenszufuhr auf dem vorgewählten pH - Wert gehalten werden muß. Auf diese Weise entsteht ein Wirkungsablauf, der sich von der Regelflüs-

sigkeit über die Elektroden, das pH - Anzeigegerät und weitere Regelglieder bis zum Bürettenhahn fortsetzt. Das letzte Glied, das den Regelkreis schließt, ist das Reagens, welches nun proportional zur Ausgangskraft der Regelflüssigkeit zugesetzt wird.

Es ist wichtig, den Begriff der Regelung streng von dem der Steuerung zu unterscheiden. Nach DIN findet bei der Steuerung keine Messung der zu beeinflussenden oder einer eindeutig von ihr abhängigen Größe statt. Der Wirkungsablauf geschieht nicht in einem geschlossenen Kreis.

Eine Steuerung des pH - Wertes hat man z. B. vor sich, wenn einer strömenden Flüssigkeit auf Grund von Messungen der Durchflussschwankungen Reagens zugesetzt wird. Damit kann zwar der pH - Wert annähernd auf eine konstante Größe gebracht werden, eine genaue Regelung ist jedoch unmöglich, da pH - Änderungen durch gleichzeitige Temperatur- oder Konzentrationsschwankungen usw. nicht berücksichtigt sind.

Eine Regelung wird stets durch eine bestimmte Anzahl hintereinander oder auch parallel geschalteter Steuerungen bewirkt. Es gibt also in einem Regelkreis stets mehrere Steuergrößen.

Steuergrößen sind z. B. die Stellungen oder die Verstellwege oder auch die Verstellgeschwindigkeiten der einzelnen Glieder des Reg-

lers, also etwa des Steuergliedes, des Kraftschalters, des Stellmotorkolbens, des Stellgliedes des Reglers. Steuergrößen sind auch alle Größen, die durch die Verstellung der Glieder des Reglers im Regler oder in der Regelstrecke geändert werden.

In den DIN - Vorschriften steht außerdem:

Eine Regelung löst die Aufgabe, den vorgegebenen Wert einer Größe, der ohne Regelung infolge störender Einflüsse in unerwünschter Weise veränderlich wäre, herzustellen und aufrechtzuerhalten. Es liegt keine Regelung vor, wenn der Wert einer Größe ohne äußeren einstellenden Eingriff von selbst bestehen bleibt.

Der Regelvorgang kann auch dann als fortlaufend angesehen werden, wenn er sich aus einer ausreichend häufigen Wiederholung gleichartiger Einzelvorgänge zusammensetzt.

Eine Regelung setzt innerhalb ihres Leistungsvermögens alle störenden Einflüsse auf den Wert der zu regelnden Größe wesentlich herab. Bei sehr genauer Regelung kann diese Herabsetzung bis unter die Grenze der Erkennbarkeit gehen.

Jeder Regler kann nur die Größe regeln, die er unmittelbar mißt. Häufig fällt die gemessene Größe nicht mit der in der ursprünglichen Aufgabenstellung genannten Größe zusammen. Die beiden Größen müssen dann in einem eindeutigen, hysteresisfreien Zusammenhang stehen.

Meßgröße und Regelgröße (11)

Bei Regelungsaufgaben wird allgemein unterschieden zwischen der Regelgröße und der Meßgröße. Sie entsprechen bei der potentiometrischen pH - Regelung dem pH - Wert und der dazugehörigen Volt- bzw. Amperezahl. Die Regelgröße ist immer diejenige Größe, die geregelt werden soll.

Meßwert, Istwert, Sollwert

Als Istwert x der Regelgröße wird ihr jeweiliger tatsächlicher

Wert bezeichnet. Der Meßwert der Regelgröße ist ihr jeweiliger vom Meßwerk des Reglers festgestellter Wert. Er kann vom Istwert abweichen, z. B. wegen Verzögerung im Fühler oder im Meßgerät. Hier kann sie entstehen wegen zeitlicher Nacheilung infolge der Masse der beweglichen Teile des Meßgerätes oder infolge Reibung.

Der Sollwert x_s ist der Wert, auf den die Regelgröße eingestellt werden soll. Ihm entspricht sinngemäß der Sollwert der Meßgröße. Genau genommen ist für die Arbeit des Reglers nicht die Regelgröße verantwortlich, sondern vielmehr die Meßgröße. Sie beeinflußt als sogenannte Reglereingangsgröße den Regler direkt.

Bei der pH - Regelstrecke stehen die Regelgröße und der aus der Meßgröße resultierende Stellstrom nicht im ganzen pH - Bereich in linearer Beziehung zueinander. Die Abweichungen sind jedoch zwischen pH 2 und pH 9 meist so klein, daß sie vernachlässigt werden können. Abb. 42 zeigt nach Otto SCHÄFER (11) die Abhängigkeit der EMK der Elektrodenkette vom pH - Wert, a) für eine ungepufferte, b) für eine gepufferte Lösung.

Bezogene Werte

Für die mathematische Betrachtung des Regelkreises ist es vorteilhaft, den Ist- und Sollwert der Regelgröße auf einen Normalwert x_n zu beziehen. Im Falle der Regelung auf einen festen Sollwert (Festwertregelung) bezieht man sich meist auf den Sollwert:

$x_s = x_n$. Der bezogene Istwert der Regelgröße ist dann: $\xi = \frac{x}{x_n}$
und der bezogene Sollwert: $\xi_s = \frac{x_s}{x_n}$

Die bezogenen Größen sind dimensionslos. Sie werden allgemein mit griechischen Buchstaben bezeichnet. Die bezogene Größe des Zeigerausschlags y des Meßwerks ist η .

Die Regelabweichung

Die Regelabweichung ist die durch eine Störung bewirkte Abweichung Δx des Istwertes der Regelgröße von ihrem Sollwert:

$\Delta x = x - x_s$. Sie wird häufig fälschlich als "Fehler" bezeichnet.

Als solchen versteht man jedoch die bleibende Abweichung des Istwertes von seinem Sollwert nach erfolgter Regelung. Sie entsteht durch fehlerhafte Wirkung des Reglers oder des Regelverfahrens. Der Regelfehler kann z. B. auf fehlerhafter Messung des Istwertes der Regelgröße, auf Lose oder auf Reibung beruhen.

Der bezogene Wert der Regelabweichung wird φ genannt:

$$\varphi = \xi - \xi_s = \frac{x - x_s}{x_n}$$

Stellgröße, Stellglied, Stellstrom

Dasjenige Glied eines Regelkreises, dessen Verstellung unmittelbar der Abweichung des Istwertes vom Sollwert entgegenwirkt, heißt Stellglied. Die von ihm geregelte Größe wird als Stellgröße m bezeichnet. In einem pH - Regelkreis entspricht das Stellglied dem Bürettenverschluß, die Stellgröße seiner Verstellung.

Auch bei der Stellgröße ist es zweckmäßig, einen Bezugspunkt zu wählen. Er entspricht meist der Stellung, die das Stellglied haben muß, um einen bestimmten Sollwert der Regelgröße aufrecht zu erhalten. Die bezogene Stellgröße ist μ . Die Meßgröße steuert direkt oder indirekt die Stellgröße.

Als Stellstrom bezeichnet man bei der pH - Regelstrecke die EMK der Elektrodenkette, die direkt oder über einen Verstärker die Änderung des Stellgliedes bewirkt.

Genau wie zwischen Regelgröße und Stellstrom, besteht auch zwischen Stellstrom und Stellgröße oft kein linearer Zusammenhang. Abb. 49 zeigt das Verhalten eines primitiven Ventils in Abhängigkeit von der Stellstromänderung nach Otto SCHÄFER (11).

Störgröße

Als Störgröße z wird jede Kraft bezeichnet, die den stationären Zustand des Sollwertes aus dem Gleichgewicht bringt. Ihr bezogener Wert ist φ .

Der Regelkreis

Jede Regelung erfolgt, wie gezeigt wurde, in einem geschlossenen Regelkreis, den man zweckmäßig in Regelstrecke und Regler unterteilt. Die Regelstrecke ist dabei definiert als das System, in dem eine Zustandsgröße beeinflusst werden soll. Als Regler wird die gesamte Vorrichtung betrachtet, die den Regelvorgang bewirkt.

Der Regler greift an mindestens zwei Stellen, der Meßstelle und der Regelstelle in die Meßstrecke ein. Eine Regelstrecke besitzt mehrere Meßstellen, falls der Regler mehrere Fühler hat; sie besitzt mehrere Regelstellen, falls der Regler mit mehreren Stellgliedern versehen ist.

Jeder Regelkreis ist als Schwingkreis zu betrachten und wird mathematisch als solcher erfaßt, wenigstens näherungsweise. Die Ziele der mathematischen Betrachtung sind:

Untersuchung der Stabilität des Kreises (12)

Es muß einmal statische Stabilität vorhanden sein, d. h. eine Auslenkung aus der Gleichgewichtslage muß wieder zu dieser zurückführen. Weiter muß dynamische Stabilität vorhanden sein, d. h. Störungen müssen sich beruhigen und dürfen nicht zu anwachsenden Schwingungen um die Gleichgewichtslage führen.

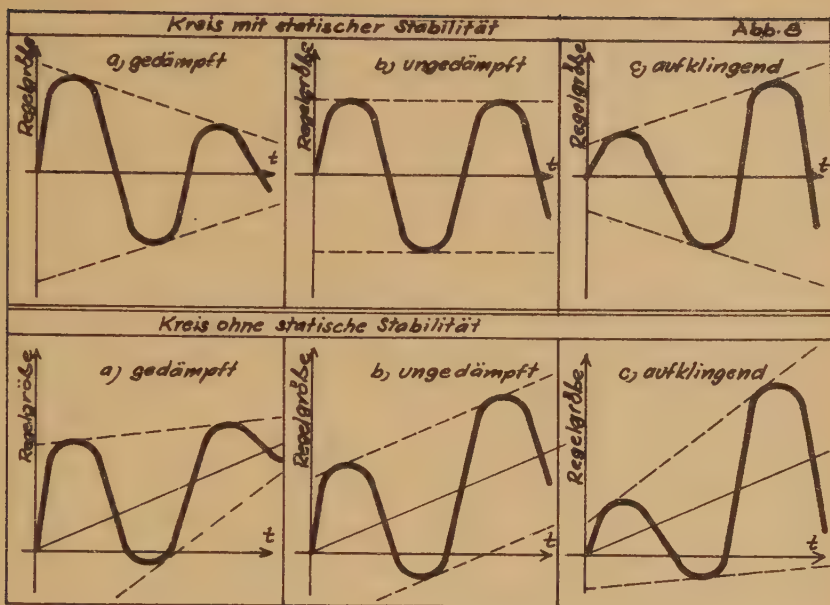
Das Stabilitätsverhalten kann man graphisch in einem Diagramm mit der Zeit als Abszisse und der Regelgröße als Ordinate auftragen. Die Fälle a - f der Abb. 8 zeigen einige Möglichkeiten.

a - c: Kreis mit statischer Stabilität.

- a) gedämpft
- b) ungedämpft
- c) aufklingend

d - f: Kreis ohne statische Stabilität.

- d) gedämpft
- e) ungedämpft
- f) aufklingend



Verhalten bei Störungen

Auch hier ist zwischen statischem und dynamischem Verhalten zu unterscheiden. Im statischen Fall soll festgestellt werden, wie weit der Regelvorgang unter Einwirkung einer andauernden störenden Kraft aus seiner Sollage abweicht.

Das dynamische Verfahren wird manchmal zur Definition des Begriffes der "Regelgüte" benutzt, wobei berücksichtigt ist, daß Abweichung und Dauer der Abweichung möglichst gering sein sollen.

Verhalten bei der Steuerung

Diese Verhalten ist wichtig, wenn der Regelvorgang nicht nur zur Aufrechterhaltung eines festbleibenden Wertes der Regelgröße dienen soll, sondern der Sollwert der Regelgröße nach bestimmten Gesetzen im Laufe der Zeit geändert wird.

Analyse und Synthese

Hat man eine fertige Regelanlage, so soll die mathematische Un-

tersuchung das Verhalten dieser Anlage angeben. Umgekehrt kann für eine gegebene Regelstrecke der geeignete Regler ermittelt bzw. können seine Zeitkonstanten eingestellt werden.

Die Regelstrecke

Arten der Regelstrecken

Verschiedene Regelstrecken lassen sich entsprechend ihrem Verhalten gegenüber einer plötzlichen anhaltenden Störung in 5 Gruppen unterteilen. Die abgebildeten Diagramme zeigen die Abhängigkeit der Regelgröße φ von einer einmaligen Stellgliedverstellung μ in der Zeit t .

1. Die Regelgröße ändert sich direkt proportional zur Störgröße. Dies ist der Fall im elektrischen Stromkreis mit rein ohmschem

Widerstand, in dem durch Verändern des Widerstandes die Spannung konstant gehalten werden soll, z. B. bei der automatischen Kompensation einer Spannung.

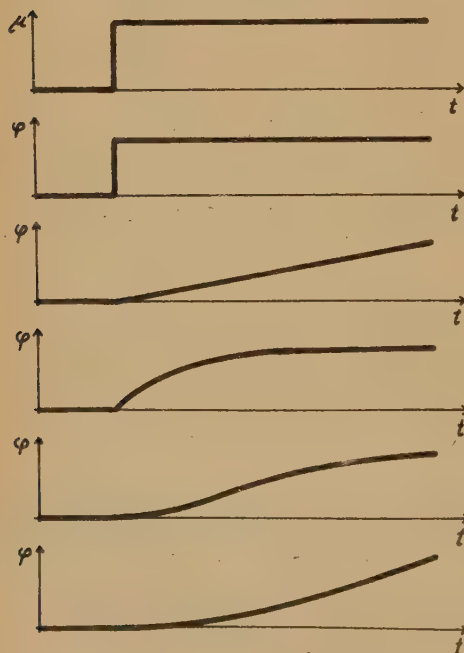


Abb. 9

2. Die Regelgröße ändert sich mit konstanter Geschwindigkeit, z. B. wenn aus einem Gefäß Wasser mit konstanter Geschwindigkeit abgelassen wird und man die Zuflußgeschwindigkeit des Speisewassers bleibend verändert, so ändert sich auch der Wasserspiegel mit konstanter Geschwindigkeit.

3. Die Regelgröße ändert sich nach einer Exponential-

funktion: Der Gasdruck in einer Rohrleitung soll auf einem bestimmten Sollwert gehalten werden.

4. Übergang auf einen anderen Wert entweder periodisch oder in gedämpften Schwingungen. Dieser Fall gilt für eine Temperaturregelstrecke, bei der durch Verstellen der Luftklappe des Ofens die Aufheizung einer Warmwasserleitung geändert wird. Es bestehen in diesem Fall hintereinandergeschaltet 2 Abhängigkeiten, und zwar: a) zwischen der Verstellung der Luftklappe und der Wassertemperatur und b) zwischen Wasser und Raumtemperatur. Bei plötzlicher Zu- oder Luftverstellung geht die Raumtemperatur aperiodisch in einen anderen Wert über, und zwar nach einer Funktion, die sich aus 2 einanderüberlagerten Exponentialfunktionen zusammensetzt.

5. Bei plötzlicher Verstellung des Stellgliedes ändert sich die Regelgröße mit einer Geschwindigkeit, die nach einer Exponentialfunktion allmählich in einen konstanten Wert übergeht. Beispiel: Flugzeug, das einen bestimmten Kurs halten soll.

Kenngrößen der Regelstrecke

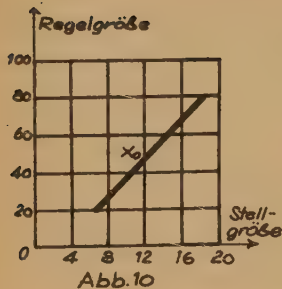
Jede Regelgröße x verändert sich nach einer Störung entsprechend einer Exponentialkurve, die durch eine Differentialgleichung höherer Ordnung zumindest angenähert werden kann.

Setzt in einer Regelstrecke nach einer Störung des stationären Zustandes ein Vorgang ein, der nach Ablauf einer gewissen Zeit ohne einen Eingriff des Reglers zu einem neuen stationären Zustand führt, so nennt man diesen Vorgang Ausgleichsvorgang.

Ausgleichswert q wird das Verhältnis der Größe einer Störung zu der durch sie bewirkten Regelgrößenänderung genannt ($q = \frac{\Delta y}{\Delta x}$). Bei der pH - Regelstrecke entspricht er der Verstellung des Bürettenhahns zur pH - Änderung.

Der Ausgleichsgrad einer pH - Regelstrecke besagt z. B. um wieviel Prozent das Stellglied verstellt werden muß, um die Regelgröße um 1 % zu ändern.

Unter der Kennlinie der Strecke versteht man eine Kurve, die die Änderung der Regelgröße in Abhängigkeit von der Stellgrößenänderung angibt. Die Abbildung zeigt die Regelgröße nur innerhalb des



angenommenen Stellbereiches, dessen eines Ende nicht mit dem Nullpunkt der Skala zusammenzufallen braucht. Der Einfachheit halber ist eine lineare Beziehung zwischen Regel- und Stellgröße angenommen.

Eine nicht lineare Kennlinie der Strecke kompliziert die Behandlung im allgemeinen nicht, da im normalen Betrieb nur kleine Bereiche um den Sollwert angesteuert werden. Eine Ausnahme bilden allerdings u. a. die Programmregelung, pH - Regelstrecken und Trennkolonnen.

Als Verstärkung der Strecke bezeichnet man den Quotienten zwischen Stellbereich (Zwischenraum zwischen größter und geringster Ventilstellung) und der dazugehörigen Änderung der Meßgröße, mit der abhängigen Variablen im Zähler

$$V_S = \frac{\text{Änderung der Regelgröße}}{\text{Stellbereich}}$$

Anlaufzeit T_a nennt man das Verhältnis der Größe einer Störung zu der durch sie bewirkten Geschwindigkeit der Regelgrößenänderung. Diese Geschwindigkeit ist meist abhängig von der Störgröße.

Die Zeitkonstante T_c einer Regelstrecke wird weiter als wichtiges Kennzeichen verwendet. Sie ist gleich dem Verhältnis der durch den Ausgleichsvorgang bewirkten Änderung der Regelgröße zu der Anfangsgeschwindigkeit dieser Änderung: $T_c = \frac{T_a}{q}$

Verläuft ein Ausgleichsvorgang nach einer normalen reziproken Exponentialfunktion, so nennt man die Konstante T_c dieser Funktion die Zeitkonstante des Ausgleichsvorganges. Geometrisch ergibt sie sich in jedem Punkt der Kurve als Subtangente auf die Asymptote (Abb. 11).

Verläuft der Ausgleichsvorgang nicht nach einer normalen reziproken Exponentialfunktion, so bedeutet das, daß die Subtangente an die Asymptote der Funktion keine Konstante ist. Da eine gute Regelung geringe Störungen rasch ausgleicht und größere Störungen sich nicht völlig auf die Regelgröße auswirken läßt, wird man

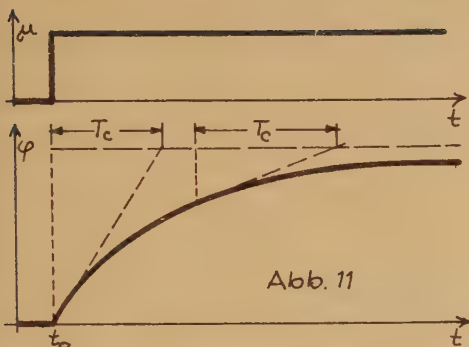


Abb. 11

Strecke abhängt.

es in vielen Fällen mit geringen Änderungen der Regelgröße zu tun haben, für die man einen Mittelwert der Subtangente, also der Zeitkonstanten bestimmen kann.

Die genaue Erfassung der Zeitkonstante ist für jeden Regelvorgang unumgänglich, da von ihr die Wahl eines geeigneten Reglers zur

Totzeit. Bei manchen Regelstrecken setzt die Regelgrößenänderung

mit zeitlich meßbarer Verzögerung nach erfolgter Stellgrößenänderung ein. Diese Zeit, die zwischen dem Augenblick der Störung und dem Beginn der ersten Sollwertabweichung liegt, nennt man die Totzeit T_t (Abb. 12). Man findet eine solche Totzeit auch bei der pH - Regelung. Auf die Totzeit folgt nun eine mehr oder weniger lange Anlaufzeit.

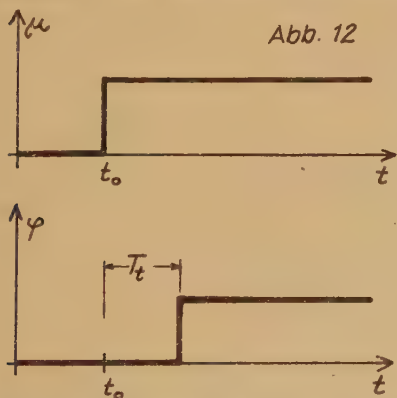


Abb. 12

Ersatztotzeit. Hat eine Regelstrecke mehrere Verzögerungsglieder, so ist ihre Anlaufzeit sehr lang. Die Übergangsfunktion der

Strecke zeigt besonders in ihrem Anfangsteil nur einen sehr geringen Anstieg, der praktisch einer Totzeit gleichkommt. Zur Vereinfachung der Funktion behandelt man ihn darum als sogen. Ersatztotzeit. Man rechnet sie vom Beginn der Störung bis zum Schnittpunkt der Tangente

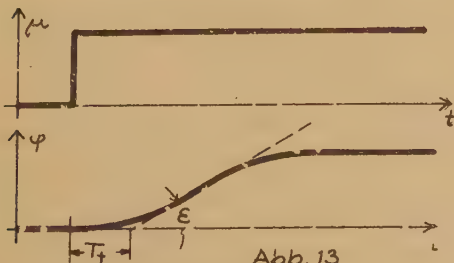


Abb. 13

im Wendepunkt der Übergangsfunktion mit der Abszisse. Die Steilheit der Kurve im Wendepunkt, d. h. der $\tan \epsilon$, ist der Verstellung des Stellgliedes proportional. (Abb. 13)

Totzeit, Anlaufszeit und Ausgleichsgrad sind dimensionsbehaftete Konstante.

Eine echte Totzeit entsteht, wenn ein Stoff oder Energie mit einer bestimmten Geschwindigkeit transportiert wird, so daß eine Änderung an einem Ort erst nach einer endlichen Zeit an einem entfernten Ort in Erscheinung tritt.

Bei pH - Regelstrecken sind Anlaufszeit und Totzeit abhängig von Art und Schnelligkeit der Reaktion, die beim Zufluß von Reagens stattfindet, sowie von der guten Durchmischung von Reagens und Regelflüssigkeit.

Bedeutung der Art einer Regelstrecke

Bei der Regelstrecke ohne Totzeit und mit geringer Anlaufszeit wirkt sich jede Stellgliedverstellung unmittelbar als Regelabweichung aus. Diese wieder beeinflußt den Regler, der nun der Regelabweichung entgegenwirkt. Ist der Sollwert erreicht, so hört damit auch der Impuls für den Regler wieder auf, der Kreis ist bis zur nächsten Regelabweichung in Ruhe.

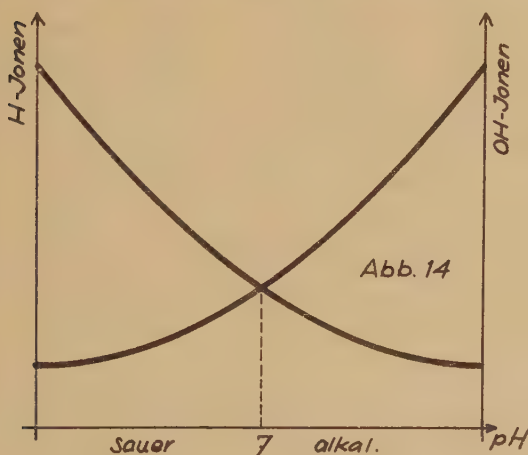
Bei einer Strecke mit großer Anlaufszeit, oder mit Anlaufszeit und Totzeit dagegen, wirkt sich jede Störgrößenänderung verzögert auf die Regelgröße aus. Eine Regelabweichung wird darum immer noch das Meßgerät des Reglers beeinflussen, wenn dieser schon längst einen ausreichenden Regelimpuls zur Rückführung der Regelabweichung auf den Sollwert abgegeben hat. Erst nach geraumer Zeit wird die Überregelung am Meßgerät sichtbar, das nun den Regler in umgekehrter Weise beeinflußt. Es entstehen Schwingungen um den Sollwert herum, die um so stärker sind, je schneller der Regler arbeitet. Nur bei Verwendung eines sehr langsamen Reglers sind diese Schwingungen in erträglichen Grenzen zu halten.

Will man für die Strecke jedoch einen schnellen Regler verwenden, so muß man dem Reglereingang einen möglichst steilen Anstieg der

Übergangsfunktion vortäuschen. Je nach der Art der Regelstrecke führt man darum dem Reglereingang nicht nur den Meßwert der Regelgröße zu, sondern auch ihren Differentialquotienten sowie ihr Zeitintegral. Zu dem gleichen Ziel kann man kommen durch den Einbau von Rückführungen an verschiedenen Gliedern des Regelkreises.

Eigenheiten der pH - Regelstrecke (13)

Bei der pH - Regelstrecke ist die Regelgröße der pH - Wert, die Meßgröße eine Spannung, Stromstärke oder Farbe (kolorimetrische Messung). pH - Einheit und dazugehöriges Spannungsintervall stehen in weiten Grenzen in annähernd linearer Beziehung zueinander. Der pH - Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Wasser-



stoffionenkonzentration.

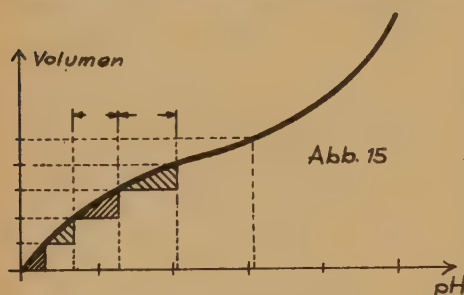
Auf eine pH - Einheit treffen also im stark saueren bzw. alkalischen Bereich wesentlich mehr H^+ - bzw. OH^- - Ionen als um den Neutralpunkt herum. Die Messung der Wasserstoffionenkonzentration ist folglich im Neutralbereich genauer als in extremen Gebieten.

Will man andererseits den pH - Wert einer Säure oder Base um 1 Einheit ändern, so richtet sich die zu dieser Änderung benötigte Reagensmenge nach dem pH - Gebiet. Sie ist in extrem saueren und alkalischen Bereichen größer als im Neutralgebiet.

Eine Regelung der Wasserstoffionenkonzentration in stark saueren und alkalischen Gebieten ist also bei potentiometrischer Messung nicht empfehlenswert, da die Wasserstoffionenkonzentrationsmessung ungenau ist. Hier greift man besser auf die konduktometrische Meßmethode zurück.

Kommt es jedoch bei der Regelung nur auf den Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration an, so ist unter Umständen in den extremen Gebieten eine recht große Genauigkeit zu erzielen, da die Regel Flüssigkeit wegen der größeren benötigten Reagensvolumina weniger leicht überregelt wird.

Will man einen bestimmten pH - Wert konstant halten, so hängt, bei gegebener Zugabegenauigkeit des Reagens durch den Regler, die Regelgenauigkeit von dem Bereich der Titrierkurve ab, in dem sich der Sollwert befindet. Die Regelgenauigkeit kann man für jeden Punkt der Titrierkurve mathematisch bestimmen (13). Einfacher ist es jedoch, an Hand der aufgezeichneten Titrierkurve zu ermitteln,



welche pH - Verschiebungen durch kleinste zugefügte Reagensmengen auftreten. Wie aus der Zeichnung zu ersehen ist, können die Regelfehler nach beiden Seiten des eingestellten pH - Wertes erheblich voneinander abweichen. Man spricht von Plus- und Minustoleranzen. In einer gut ge-

pufferten Lösung bewirkt eine relativ große Reagenszufuhr nur kleine Regelabweichungen. Es ist daher leicht einzusehen, daß bei ungepufferten Lösungen die Regelgenauigkeit viel geringer sein muß, als bei gut gepufferten. Regeltoleranzen von unter 0,1 pH sind bei ihnen praktisch nicht zu erreichen. Maßgeblich ist dabei natürlich die Pufferung im Bereich des angestrebten pH - Wertes.

Die Genauigkeit der pH - Regelung auf Grund der Zugabegenauigkeit von Reagens kann man wie folgt in Formeln fassen:

Soll eine Lösung vom pH - Wert pH_2 auf den pH - Wert pH_1 eingestellt werden, so beträgt der auszugleichende pH - Unterschied $pH_1 - pH_2 = \Delta pH$. Die pH - Änderung wird durch die Wasserstoffionenkonzentrationsänderung hervorgerufen, die durch Zusatz äquivalenter Säure- oder Basenmengen bestimmt ist. Es muß deshalb das Verhältnis der zulässigen Schwankungen zwischen Soll- und Istwert der Wasserstoffionenkonzentration $\Delta C_{H_1}^+$ zur Gesamtkonzentrationsänderung $CH_2^+ - CH_1^+$ ein Maß für die Zugabegenauig-

keit an Säure oder Lauge sein. Die Zugabegenauigkeit G des Reglers in Prozent ist also:

$$G = \frac{\Delta C_{H_1^+}}{C_{H_2^+} - C_{H_1^+}} \cdot 100 \%$$

$C_{H_1^+}$ sei die Wasserstoffionenkonzentration, die die größte zulässige Abweichung gegenüber dem Sollwert C_{H_1} besitzt; pH_1 sei der entsprechende pH - Wert. Es ist also

$$C_{H_1^+}' - C_{H_1^+} = \Delta C_{H_1^+}; \quad pH_1' - pH_1 = \Delta pH$$

$$G = \frac{C_{H_1^+}' - C_{H_1^+}}{C_{H_2^+} - C_{H_1^+}} \cdot 100 \%$$

Oder:

$$G = \frac{\frac{C_{H_1^+}'}{C_{H_1^+}} - 1}{\frac{C_{H_2^+}}{C_{H_1^+}} - 1} \cdot 100 \%$$

und da $C_H^+ = 10^{-pH}$ so ist

$$G = \frac{\frac{10^{-pH_1'}}{10^{-pH_1}} - 1}{\frac{10^{-pH_2}}{10^{-pH_1}} - 1} \cdot 100 \%$$

oder

$$G = \frac{10^{-(pH_1' - pH_1)} - 1}{10^{-(pH_2 - pH_1)} - 1} \cdot 100 \%$$

Die Zugabegenauigkeit G ist eine Funktion der Regelanlage. Sie läßt sich errechnen, bzw. es muß für die nötige Zugabegenauigkeit des Regelgerätes bei geforderter Regelgenauigkeit gesorgt werden. Maßgebend für die Zugabegenauigkeit an Reagens bzw. die Stufigkeit des Reglers sind:

1. die Einstelltoleranz des Stellgliedes,
2. die Schrittgröße des Regelantriebes,
3. die Toleranz der Mengenabmessung (Tröpfchengröße).

Wird bei der Regelung der Neutralisationspunkt durchschritten (einzuregelnder pH auf der alkalischen Seite, die zu regelnde Lösung im sauren pH - Bereich und umgekehrt), so ist für die Regelgenauigkeit nicht mehr der pH der zu regelnden Lösung, sondern der pH des Zusatzmittels bestimmend! In der letzten Gleichung ist darum Δ pH der Unterschied zwischen dem pH - Wert des Zusatzmittels und dem einzustellenden pH - Wert.

Vergleicht man die Zugabegenauigkeit mit der Regelgenauigkeit, so ergibt sich daraus der Wert der pH - Regelung.

Zur Verbesserung der Regelgenauigkeit bei ungepufferten Lösungen und bei der Überbrückung großer pH - Unterschiede kann man

1. in mehreren Stufen regeln. Dabei regelt man die Flüssigkeit in einem ersten Gefäß auf eine gewisse Fehlerbreite, z. B. von ± 1 pH vor. In dem zweiten Gefäß kann man den Fehler durch erneute Regelung vermindern und so fort, bis die verlangte Genauigkeit der Regelung erreicht ist.

2. einen Fixierpuffer der zu regelnden Flüssigkeit zufügen, wobei man durch Rechnung die minimale Menge an Puffer für die geforderte Toleranz ermittelt.

Von der errechneten Regelgenauigkeit auf Grund einer kleinsten zugefügten Reagensmenge ist streng zu trennen die Schnelligkeit, mit der eine Regelabweichung vom Sollwert wieder beseitigt werden

kann. Hierbei handelt es sich um das Zeitintegral der Regelabweichung, die sogen. Regelfläche (Abb. 16), die abhängt von der Totzeit und der Anlaufzeit der Regelstrecke, sowie von der Bauart des verwendeten

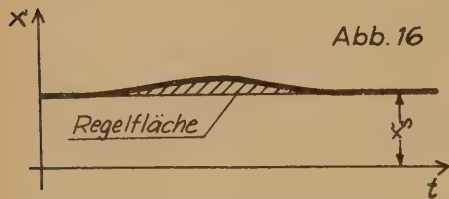


Abb. 16

Reglers. Die Verzögerung der Auswirkung einer durch den Regler veranlaßten Berichtigung an der Meßstelle auf Grund 1. der Anzeigeträgheit des Meßorgans, 2. der Trägheit des Reglers, 3. der Trägheit der Regelstrecke (Pufferung, Anlaufzeit, Totzeit), 4. Impulzzahl die der Regler empfängt, wirkt natürlich im Sinne einer Verzögerung der Regeltoleranz.

Wie schon bemerkt wurde, ist die pH - Regelstrecke insgesamt, als Regelstrecke mit Anlaufs- und mit Totzeit zu betrachten.

D e r R e g l e r

Es gibt eine große Anzahl von Reglern, doch noch viel größer ist die Zahl ihrer Namen. Sie entstanden, weil es möglich ist, Regler nach verschiedenartigen Gesichtspunkten zu ordnen. Die nun folgende Einteilung nach DIN soll einen kleinen Überblick geben.

Einteilung der Regler (9)

I. Einteilung der Regler nach der Regelgröße

Mengenregler, Konzentrationsregler (pH - Wert), Temperaturregler...

II. Regler ohne und mit Hilfskraft

1. unmittelbar wirkender Regler. Ein unmittelbar wirkender Regler ist ein Regler, bei dem die zur Verstellung des Stellgliedes erforderliche Arbeit mittels des Fühlers der Regelstrecke entnommen wird. (Abb. 17)

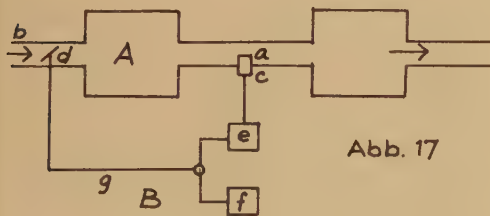


Abb. 17

Zuflußregelung:

A = Regelstrecke

B = Regler

a = Meßstelle

b = Regelstelle

c = Fühler

d = Stellglied

e = Meßwerk

f = Sollwertinsteller

g = Übertragungseinrichtung

2. mittelbar wirkender Regler. Ein mittelbar wirkender Regler ist ein Regler, bei dem die zur Verstellung des Stellgliedes erforderliche Arbeit einer Hilfsenergiequelle entnommen wird. Man kann unterscheiden zwischen Reglern mit besonderer Hilfsenergiequelle und solchen, bei denen die Regelstrecke selbst als Hilfsenergiequelle dient. (Abb. 18).

Ein mittelbar wirkender Regler wird dann verwendet, wenn die durch die Fühler entnommene Arbeit zu gering ist, um das Stellglied zu betätigen; außerdem kann man die Masse der beweglichen Teile des Meßwerks meist vermindern, da es weniger Kraft braucht um den

Kraftschalter zu betätigen, als das Stellglied zu verstellen. So

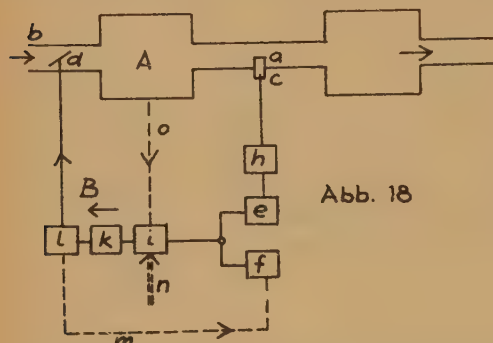


Abb. 18

- h = Meßwertverstärker
- i = Kraftschalter
- k = Verstärker
- l = Stellmotor
- m = Rückführung
- n = Energiezufuhr von außen
- o = Energiezufuhr aus der Regelstrecke

werden Eigenschwingungen des Meßwerks reduziert.

III. Einteilung der Regler nach der Art der Sollwerteinstellung

1. Festwertregler. Ein Festwertregler (Konstantregler) ist ein Regler, der eine Größe auf einen festen Sollwert regelt: $x = x_s$.

2. Fahrplanregler. Ein Fahrplanregler (Programmregler) ist ein Regler, der eine Größe auf einen nach einer vorgegebenen Zeitfunktion sich ändernden Sollwert regelt: $x = x_s = f(t)$.

3. Folgeregler. Ein Folgeregler ist ein Regler, der eine Größe auf einen Sollwert regelt, der durch ein zusätzliches Meßwerk gesteuert wird, das eine vom Regler nicht beeinflusste Größe mißt: $x = x_s = f(y)$, wobei $y = \text{Meßgröße}$. Der Folgeregler unterscheidet sich von einem Fahrplanregler dadurch, daß bei ihm der Fahrplan nicht vorgegeben ist, sondern durch den zeitlichen Verlauf des Meßwertes einer von der Regelung unbeeinflussten Größe bestimmt wird.

IV. Einteilung der Regler nach der Art der Abhängigkeit des Sollwertes von der Belastung

1. Regler ohne Kopplung. Ein Regler ohne Kopplung ist ein Regler, dessen Sollwert in jedem Augenblick, also auch während des Regelvorganges von der Belastung unabhängig ist. Der Regler ohne Kopplung ist ein Regler ohne Ungleichförmigkeit.

2. Regler mit fester Kopplung. Ein Regler mit fester Kopplung ist ein Regler, bei dem jedem Wert der Belastung ein bestimmter Sollwert entspricht. Diese Regler besitzen einen konstanten Un-

gleichförmigkeitsgrad. Eine feste Kopplung ist bei den meisten unmittelbar wirkenden Reglern gegeben. Bei mittelbar wirkenden Reglern wird sie häufig aus Stabilitätsgründen durch besondere Einrichtungen, z. B. starre Rückführung, herbeigeführt.

3. Regler mit nachgiebiger Kopplung. Ein Regler mit nachgiebiger Kopplung ist ein Regler, bei dem sich der Sollwert während des Regelvorganges in Abhängigkeit von der Belastung und von der Zeit ändert. Es gibt

a) solche, bei denen der Sollwert nach beendetem Regelvorgang von der Belastung unabhängig ist,

b) solche, bei denen der Sollwert nach beendetem Regelvorgang einen bestimmten von der Belastung abhängigen Wert annimmt.

Im Falle a) verschwindet der Ungleichförmigkeitsgrad mit Beendigung des Regelvorganges. Im Falle b) ist ein bleibender positiver oder negativer Ungleichförmigkeitsgrad vorhanden.

Die nachgiebige Kopplung wird durch eine nachgiebige Rückführung herbeigeführt.

4. Gleichwertregler. Ein Gleichwertregler ist ein Festwertregler, der stets auf den gleichen Sollwert regelt, unabhängig von der Belastung. Es gibt Festwertregler ohne Kopplung oder Festwertregler mit nachgiebiger Kopplung und verschiedenem Ungleichförmigkeitsgrad.

V. Einteilung der Regler nach der Gleichung des Reglers

1. Regler mit Stellungszuordnung. Ein Regler mit Stellungszuordnung ist ein Regler, bei dem der Regelabweichung φ die Stellung μ des Stellgliedes zugeordnet ist.

2. Regler mit Stellgeschwindigkeitszuordnung. Ein Regler mit Stellgeschwindigkeitszuordnung ist ein Regler, bei dem der Regelabweichung φ die Stellgeschwindigkeit $\dot{\mu}$ des Stellgliedes zugeordnet ist.

3. Regler mit Stellbeschleunigungszuordnung. Ein Regler mit Stellbeschleunigungszuordnung ist ein Regler, bei dem der Regelabweichung φ die Stellbeschleunigung $\ddot{\mu}$ des Stellgliedes zugeordnet ist.

VI. Einteilung der Regler nach der Kontinuität oder Diskontinuität ihrer Wirkungsweise

1. Stetig wirkender Regler. Ein stetig (kontinuierlich) wirkender Regler ist ein Regler, der ununterbrochen arbeitsbereit ist und

dessen bewegliche Glieder (z. B. Meßwerk, Kraftschalter, Stellglied) stetig (zügig) verstellt werden.

Seine Stellgeschwindigkeit ist entweder veränderlich oder unveränderlich.

2. Stufenregler. Ein Stufenregler ist ein Regler, bei dem entweder die Stellung des Stellgliedes oder die Stellgeschwindigkeit stufenweise geändert wird. Stufenregler können ununterbrochen arbeitsbereit oder auch in bestimmten Intervallen nicht arbeitsbereit (Schrittregler) sein.

Beim Stufenregler mit stufenweiser Änderung der Stellgeschwindigkeit bleibt das Stellglied in der Ruhelage, bis der Ausschlag des Meßwerks einen bestimmten Wert erreicht und bewegt sich dann mit konstanter Geschwindigkeit in der einen oder anderen Richtung. Bei weiterer Änderung des Meßwerkausschlages behält die Stellgeschwindigkeit ihren Wert bei, bis zunächst bei einem bestimmten weiteren Wert des Ausschlages eine Änderung um einen bestimmten Betrag erfolgt. Grenzfälle sind der Auf - Zu - Regler und Regler, bei denen sich das Stellglied nur mit konstanter Geschwindigkeit in der einen oder in der anderen Richtung bewegen kann.

3. Schrittregler. Ein Schrittregler ist ein Regler, der zeitweise, meist in periodisch wiederkehrenden Abständen nicht arbeitsbereit ist (bedingt z. B. durch Fallbügelkraftschalter oder durch einen Unterbrecher). Der Schrittregler kann gleichzeitig ein Stufenregler sein.

Die Einzelteile eines Reglers

Die Meßeinrichtung

Die Meßeinrichtung beginnt mit einem oder mehreren Fühlern. Bei der pH - Regelung entsprechen sie den Elektroden und eventuell einer zusätzlichen Meßblende, die auch den Druck einer fließenden Meßlösung ständig kontrolliert und als Regelimpuls weiterleitet. Die Aufgabe der Fühler ist, eine Meßgröße in ihrer Ausgangsform zu erfassen und sie als Regelimpuls weiterzuleiten. Der Fühler entnimmt an der Meßstelle aus der Regelstrecke die Arbeit zur Verstellung des Stellgliedes des Reglers bzw. des Steuergliedes eines Kraftschalters, oder zur Steuerung einer Hilfsenergiequelle.

Ein Meßwertverstärker dient zur unmittelbaren Verstärkung der vom

Fühler aus der Regelstrecke entnommenen Arbeit.

Im Meßwerk wird der Meßwert einer Größe unter Umformung in eine mechanische Größe festgestellt. Man unterscheidet ein statisches und ein astatisches Meßwerk. Beim statischen Meßwerk entspricht jedem Wert der Meßgröße innerhalb des Meßbereiches im Beharrungszustand eine bestimmte Stellung des Zeigers. Dagegen kann das astatische Meßwerk nur bei einem einzigen Wert der Meßgröße im Beharrungszustand sein. Bei einer Abweichung von diesem Wert geht der Zeiger stets in die obere oder untere Grenzlage über.

Das anzeigende Meßwerk kann unter Umständen in einer Regelanlage fehlen. Die Regelabweichung oder die Regelspanne wird dann in einer sogenannten Meßschaltung gebildet.

Regelspanne heißt ein Wert, der sich aus den Meßwerten aller Anregungsgrößen (z. B. zeitlicher Ableitung der Regelgröße oder Integral der Regelgröße über der Regelabweichung, Rückführung usw.) eines Reglers zusammensetzt. Im einfachsten Fall ist die Regelspanne gleich der Regelabweichung (Abweichung des Istwertes vom Sollwert). Wie die Regelspanne durch die einzelnen Anregungsgrößen bestimmt wird, hängt jeweils von der Bauart des Reglers ab. Es ist jedoch stets erforderlich, sämtliche Anregungsgrößen durch dieselbe Vergleichsgröße darzustellen.

Zur Meßeinrichtung gehört weiter der Sollwerteinsteller, mit dessen Hilfe der Sollwert eingestellt wird.

Kraftschalter und Verstärker

Beim mittelbar wirkenden Regler wird nach Maßgabe der Regelspanne durch den Kraftschalter eine Hilfsenergie in den Regelkreis eingesteuert. Der Kraftschalter ist meist ein Verstärker, zuweilen aber auch nur ein Energieumwandler. Der die Hilfsenergie steuernde, auf die Regelabweichung bzw. die Regelspanne ansprechende Teil des Kraftschalters ist sein Steuerglied.

Ein pH - Regelgerät der Firma Askania wandelt z. B. die elektrische Energie der Elektroden in einen Zeigerausschlag um und läßt durch ihn eine Luftdüse steuern. (19)

An Kraftschaltern kann man unterscheiden:

- a) solche mit kontinuierlicher Steuerung der Hilfsenergie (Askaniaschalter)
- b) Kraftschalter mit stufenweiser Steuerung der Hilfsenergie (Fallbügelkraftschalter mit Stufenblech)
- c) Kraftschalter mit schrittweiser Steuerung der Hilfsenergie (gewöhnlicher Fallbügelregler)

Bilden Meßwerk, Sollwertgeber und Kraftschalter eine bauliche Einheit, so bezeichnet man diese oft als Steuerwerk des Reglers.

Stellmotor und Stellgetriebe

Der Stellmotor des mittelbar wirkenden Reglers dient zur Verstellung des Stellgliedes. Man verwendet meist hydraulische oder elektrische Motoren.

Häufig erfolgt die Verstellung des Stellgliedes durch den Stellmotor über ein besonderes Stellgetriebe.

Das Stellglied

Es wird bei der pH - Regelung im einfachsten Fall von einem Bürettenhahn gebildet, der durch eine mechanische Vorrichtung geöffnet oder geschlossen wird. Weiter ist es möglich, den Reagensfluß durch eine Irisblende oder durch ein elektromagnetisches Ventil zu regulieren usw.

Stabilisierungseinrichtungen

Ein Regler, der aus den beschriebenen Gliedern aufgebaut ist, verursacht im Regelkreis häufig unzulässige Schwingungen. Um solche Pendelungen der Regelgröße um ihren Sollwert herum zu verhüten, muß man Stabilisierungseinrichtungen verwenden.

Rückführungen. Unter einer Rückführung versteht man eine (mechanische, hydraulische, pneumatische, thermische oder elektrische) Verbindung des Stellgliedes oder des Stellmotors des Reglers mit einem davorliegenden Gliede desselben Reglers, durch die eine

Rückwirkung der Stellung des Stellgliedes oder des Stellmotors auf das davorliegende Glied herbeigeführt wird. Dadurch entsteht eine Dämpfung der stellgliedverstellenden Kraft. Der Regler spricht also auf einen Regelimpuls weniger stark an, als er das ohne Rückführung tun würde und auf diese Weise erzielt man bei Strecken mit Anlaufs- und Totzeit bessere Regelergebnisse. Außerdem bewirkt die Rückführung eine Dämpfung der im Regelkreis entstehenden Schwingungen.

Starre Rückführung. Bei einer starren Rückführung ändert sich der Einfluß der Verstellung des Stellgliedes bzw. des Stellmotors auf das mit ihm verbundene davorliegende Glied des Reglers nicht.

Hat man einen Regler mit Stellgeschwindigkeitszuordnung (I - Regler) und starrer Rückführung, so ist eine Regelung auf einen festen Sollwert nicht möglich; man nimmt vielmehr, um eine Stabilisierung des Regelvorganges zu erreichen, eine durch den Ungleichförmigkeitsgrad (s. S. 43) bestimmte Abweichung des Istwertes der Regelgröße nach beendetem Regelvorgang von einem mittleren Sollwert aus Stabilisierungsgründen in Kauf. Die starre Rückführung erzeugt praktisch einen proportional wirkenden Regler.

Nachgiebige Rückführung. Bei der nachgiebigen Rückführung ändert sich der Einfluß der Verstellung des Stellgliedes bzw. des Stellmotors auf das mit ihm verbundene, davorliegende Glied des Reglers während des Regelvorganges. Im allgemeinen besteht die Ungleichförmigkeit bei der nachgiebigen Rückführung nur während des Regelvorganges und verschwindet mit seiner Beendigung.

Differentialquotienteneinfluß zur Stabilisierung

Mißt man außer der Regelgröße auch ihren Differentialquotienten und benutzt diesen als zusätzliche Anregungsgröße, so ist die hierzu erforderliche Einrichtung als eine Stabilisierungseinrichtung anzusehen.

Unterbrecher

Ebenso kann ein in den Regler eingebauter Unterbrecher als Stabilisierungseinrichtung dienen. Die Pausendauer muß hierbei in

der Größenordnung der Anlaufzeit liegen.

Bremsen

Zur Stabilisierung des Regelvorganges dienen häufig am Meßwerk oder u. U. auch an einem anderen Bauteil des Reglers angebrachte Bremsen, deren Bewegungswiderstand je nach Bauart linear oder quadratisch mit der Geschwindigkeit wächst und bei Stillstand verschwindet. Bremsen sind natürlich nur dann wirksam, wenn die Schwingungen von der trägen Masse der Regelteile verursacht werden.

Kenngrößen eines Reglers

Fühlkraft, Gegenkraft, Spannkraft, Stellkraft

Als Fühlkraft wird die vom Fühler auf das Zeigersystem usw. ausgeübte Kraft bezeichnet.

Die Gegenkraft wirkt der Fühlkraft entgegen, z. B. über den Sollwerteneinsteller.

Spannkraft heißt die Differenz zwischen Fühlkraft und Gegenkraft im Fall des unmittelbar wirkenden Reglers und des mittelbar wirkenden Reglers ohne Rückführung.

Die Stellkraft ist die zur Verstellung des Stellgliedes erforderliche Kraft. Sie ist bei unmittelbar wirkenden Reglern gleich der Spannkraft. Beim mittelbar wirkenden Regler dagegen bewirkt die Spannkraft nur die Verstellung des Kraftschalters, während die Stellkraft einer Hilfsstromquelle entnommen wird, die u. U. die Regelstrecke selbst sein kann.

Bezeichnung der Ausschläge bzw. der Verstellungen der Glieder des Reglers

Der Ausschlag des Meßwerkzeigers wird mit y bezeichnet und der auf den maximalen Ausschlag bezogene Ausschlag mit η ; $\eta = \frac{y}{y_{\max}}$

Die Verstellung des Stellgliedes ist mit m und ihr bezogener Wert

mit μ benannt. $\mu = \frac{m}{m_{\max}}$

Ist die Stellgliedbewegung gleich der Bewegung des Zeigers, wie es bei unmittelbar wirkenden Reglern meist der Fall ist, so soll die Bezeichnung m bzw. μ nicht y bzw. η verwandt werden.

Die Verstellung des Steuergliedes des Kraftschalters ist s , der bezogene Wert ξ ; $\xi = \frac{s}{s_{\max}}$

Die Verstellung der Rückführung ist durch z gekennzeichnet, bei nachgebender Rückführung, und bezogen durch ξ ; $\xi = \frac{z}{z_{\max}}$

Häufig wird jedoch für die Rückführung der Buchstabe ϱ verwendet, während z die Größe eines Störwertes angibt.

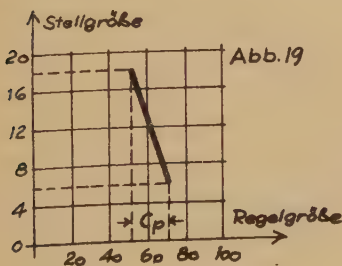
Die Gleichung des Reglers

Die Gleichung des Reglers zeigt die Abhängigkeit der Verstellung des Stellgliedes des Reglers von der Regelabweichung.

Gleichung eines bestimmten Reglergliedes, z. B. Gleichung des Meßwerks, des Kraftschalters, des Stellgliedes, wird die Beziehung genannt, die die Abhängigkeit der Verstellung des Stellgliedes von der Änderung bzw. Verstellung des (u. U. auch der) direkt vorhergehenden darstellt.

Kennlinie, Proportionalbereich, Verstärkung des Reglers

Die Kennlinie des Reglers zeigt die Stellgröße als Abhängige der Regel- bzw. der Meßgröße. Das Stellglied durchläuft bei starken Störungen einen großen Teil seines Bereiches. Ist die Kennlinie gekrümmt und wird sie durch eine Gerade ersetzt, die den mittleren Teil richtig wiedergibt, so liegen die scheinbaren Proportionalbereichsgrenzen anders als die wirklichen. (Abb. 19)



Als Proportionalbereich x_p bezeichnet man diejenige Änderung der

Regelgröße, die erforderlich ist, um das Stellglied einen Gesamthub durchlaufen zu lassen. Er wird grundsätzlich in Einheiten der Regelgröße angegeben.

Als Verstärkung des Reglers wird, analog zur Verstärkung der Strecke, der Quotient zwischen Proportionalbereich und dazugehöriger Änderung der Stellgröße, bzw. bei gekrümmter Kennlinie der Differentialquotient bezeichnet, wobei die abhängige Variable im Zähler steht.

$$V_R = \frac{\text{Änderung der Stellgröße}}{\text{Proportionalbereich}}$$

Nachdem für die Strecke das positive Vorzeichen gewählt wurde, ist V_R negativ.

Ungleichförmigkeitsgrad, Meßbereich, Kopplungszahl

Ungleichförmigkeitsgrad des Reglers

Der Ungleichförmigkeitsgrad eines Reglers ist gleich der Differenz der den Grenzstellungen seines Stellgliedes im Beharrungszustand entsprechenden bezogenen Werte der Regelgröße

$$\gamma = \xi_{\max \mu} - \xi_{\min \mu} = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_n}$$

Ist eine Störung gleichbedeutend mit einer Belastungsänderung, so ist die zum Ausgleich der Störung erforderliche Verstellung des Stellgliedes ein Maß für die Belastungsänderung. Wird ein Regler mit bleibendem Ungleichförmigkeitsgrad benutzt, so entspricht also jeder Belastung ein bestimmter Wert der Regelgröße im Beharrungszustand. Betrachtet man diesen Wert der Regelgröße, auf den diese ja durch den Regler eingeregelt wird, als ihren Sollwert, so kann man den Regler mit bleibendem Ungleichförmigkeitsgrad auch als einen Regler mit belastungsabhängigem Sollwert bezeichnen.

Da es nicht möglich ist, mit einem Regler mit bleibendem Ungleichförmigkeitsgrad stets auf den gleichen Sollwert zu regeln (Gleichwertregler), ist also der Ungleichförmigkeitsgrad, soweit es die Aufgabe der Regelung ist, eine Größe auf einem festen Sollwert zu halten, als ein Nachteil der Regelung anzusehen. Jedoch ist man in zahlreichen Fällen gezwungen, einen Ungleichförmigkeitsgrad von meist wenigen Prozent des Normalwertes der Regelgröße aus Gründen der Stabilität in Kauf zu nehmen.

Meßbereich

Der auf den Normalwert der Regelgröße bezogene Meßbereich des

statischen Meßwerks wird mit δ bezeichnet.

Kopplungszahl

Die Kopplungszahl K eines Reglers ist das Verhältnis zwischen dem Ungleichförmigkeitsgrad γ des Reglers und dem Meßbereich δ des Meßwerks $K = \gamma/\delta$

Wenn also die Grenzstellungen des Stellgliedes den Grenzlagen des Zeigers des Meßwerks entsprechen, bzw. der ganze Verstellweg des Stellgliedes dem ganzen Ausschlag des Zeigers, was häufig der Fall sein wird, so wird $K = 1$ und damit $\gamma = \delta$ d. h. der Ungleichförmigkeitsgrad des Reglers gleich dem Meßbereich des Meßwerks.

Stellzeit, Verzögerungszeiten

Stellgeschwindigkeit eines Reglers und Stellzeit. Unter der Stellgeschwindigkeit eines Reglers wird die Geschwindigkeit verstanden, mit der sein Stellglied verstellt wird.

Die Stellgeschwindigkeit eines mittelbar wirkenden Reglers kann von der Regelabweichung und damit vom Ausschlag des Zeigers des Meßwerks bzw. des Steuergliedes des Kraftschalters abhängig sein oder auch nicht. (Strahlrohrkraftschalter: Proportionalität besteht; astatisches Meßwerk: es besteht keine Proportionalität)

Bei einem mittelbar wirkenden Regler mit einem Kraftschalter mit Stellgeschwindigkeitszuordnung ist die Stellzeit T_s das Verhältnis der Verstellung σ des Steuergliedes des Kraftschalters zu der Geschwindigkeit μ der durch sie bewirkten Verstellung des Stellgliedes.

Verzögerungszeiten. Häufig treten im Regler Verzögerungen bei der Energieübertragung von einem Glied auf das andere auf.

Unter einer Verzögerungszeit soll das Verhältnis der Änderung einer Veränderlichen des Regelkreises zu der Anfangsgeschwindigkeit der durch sie bedingten Änderung der nachgeordneten Veränderlichen verstanden werden. Die Verzögerungszeit wird T_v bezeichnet. Zur weiteren Unterscheidung kann man verwenden für die Meßwertzeigerverzögerung $T_{v\eta}$, die Steuergliedverzögerung $T_{v\sigma}$ usw.

Auch die Anlaufzeit der Regelstrecke ist im Falle einer Regelstrecke mit Ausgleich als eine Verzögerungszeit anzusehen und ebenso die Stellzeit des Reglers im Falle des Reglers mit Rückführung.

Im allgemeinen sind die Verzögerungszeiten für die Regelaufgabe

störend. Im Spezialfall kann jedoch durch Anbringen einer Bremse eine Verzögerung bewirkt werden, um die Eigenschwingungen des Reglergliedes zu dämpfen.

Nacheilungszeiten. Unter Nacheilungen sollen Verschleppungen in der Energieübertragung verstanden werden, die im Regler z. B. durch toten Gang in der Regelstrecke, z. B. durch eine große Entfernung zwischen Regelstelle und Meßstelle, hervorgerufen werden. Beispiel: Bei einer Temperaturregelung durch Mischen einer kalten und einer warmen Flüssigkeit bei großer Entfernung des Mischventils vom Fühler.

Unter der Nacheilungszeit T_n wird die Zeit verstanden, um die infolge einer Nacheilung die Änderung der nachgeordneten Größe gegen die Änderung der vorausgehenden zeitlich verschoben ist.

Fallzeiten

Unter der Fallzeit eines Reglergliedes wird die Konstante verstanden, die den Einfluß der Masse des beweglichen Teiles dieses Gliedes auf den Regelvorgang kennzeichnet. Sie wird mit T_f bezeichnet.

Rückführzeit

Die Rückführzeit T_r ist die Zeit, in der der Rückführpunkt bei maximaler Geschwindigkeit des Stellgliedes seinen ganzen Verstellweg durchläuft.

Ansprechgrenzen, Unempfindlichkeitsgrad

Unter Ansprechgrenzen eines Reglers versteht man die Mindestwerte, die die Regelabweichung in der einen oder der anderen Richtung annehmen muß, damit der Regler in Tätigkeit tritt.

Die Differenz der bezogenen Werte der Regelgröße bzw. der Regelabweichung, bei denen der Regler anspricht (Ansprechgrenzen), bezeichnet man als Unempfindlichkeitsgrad ϵ des Reglers.

$$\epsilon = \xi_2 - \xi_1 = \varphi_2 - \varphi_1$$

Je kleiner der Unempfindlichkeitsgrad ist, bei um so kleinerem φ greift der Regler ein.

Besondere, bei diskontinuierlich wirkenden Reglern vorkommende Begriffe

Stufenweise veränderliche Größe, Stufe. Eine Größe heißt stufenweise veränderlich, wenn sie sich nur um bestimmte endliche Be-

träge ändert. (z. B. Stellglied nur stufenweise veränderlich)

Die Stufe ist die Differenz zweier aufeinanderfolgender Werte einer stufenweise veränderlichen Größe.

Schrittweise veränderliche Größe, Schritt, Pause, Takt. Eine Größe heißt schrittweise veränderlich, wenn sie sich nur während bestimmter, nicht zusammenhängender Zeitintervalle ändert.

Ist z. B. die Stellung des Stellgliedes schrittweise veränderlich, so bedeutet das, daß das Stellglied nur in gewissen Zeitabständen eine bestimmte Zeit lang verstellt wird und anschließend für eine bestimmte Zeit in seiner Stellung stehen bleibt. (Schrittregler)

Das Zeitintervall, während dem eine schrittweise veränderliche Größe sich verändert, heißt der Schritt, die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schritten, während der sie unverändert bleibt, die Pause. Das Verhältnis vom Schritt zur nachfolgenden Pause ist der Takt der schrittweise veränderlichen Größe.

V e r s c h i e d e n e R e g l e r t y p e n

Stetig wirkende Regler

1. Der langsamste Teil eines Reglers ist gewöhnlich der Stellmotor, weil hier die größten Massen zu bewegen sind. Meßeinrichtungen, auch mit mechanisch bewegten Teilen, sind vergleichsweise schnell, so daß die Übergangsfunktion der Grundtypen praktisch vom Stellmotor allein abhängt.

2. Meßgeräte mit Rückstellfeder können gedämpfte Eigenschwingungen ausführen, die sich u. U. auf die folgenden Teile des Reglers übertragen. Das ist wegen deren Trägheit selten; außerdem ist es einfach, die Dämpfung so groß zu machen, daß die Einstellung aperiodisch wird und das Meßgerät mit guter Näherung durch ein System 1. Ordnung mit einer - meist sehr kleinen - Zeitkonstanten beschrieben werden kann.

3. Je weiter die Entwicklung fortschreitet, desto mehr nähern sich

alle Bauformen dem "geeichten Universalregler", der durch 2, höchstens 3 Parameter bestimmt wird, die ihrerseits willkürlich und unabhängig voneinander in weiten Bereichen einstellbar sind.

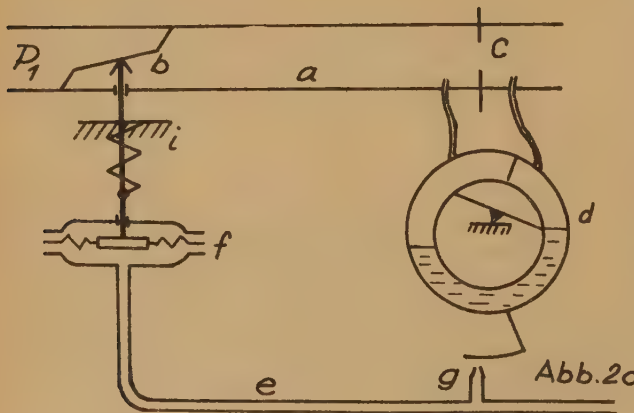
Der P - (proportional wirkende) Regler

Beim P - Regler ist die Stellgröße der Meßgröße proportional. Es handelt sich also um einen sogenannten Regler mit Stellungszuordnung.

P - Regler sind zur pH - Regelung ungeeignet. In Kombination mit anderen Regelprinzipien werden sie jedoch verwendet, und es ist darum unerlässlich, sich eingehend mit ihnen zu beschäftigen.

Geregelt werden soll z. B. der Druck (Abb. 20) in einer strömenden Flüssigkeit a. Zu diesem Zweck wird an einer Meßblende c der

Druck mittels einer Ringwaage d gemessen. Mit ihr verbunden ist eine Prallplatte h, deren Gestalt und Neigung die Kennlinie des Reglers beeinflussen kann. Die Stellung der Blende h auf der Achse der Ringwaage bestimmt den Sollwert. Da eine



jedoch äußerst unbequem wäre, wird die Spannung der Feder i, welche dem auf die Membran f wirkenden Steuerdrucke das Gleichgewicht hält, durch Verschiebung des Gegenlagers nach dem gewünschten Sollwert bemessen.

Die Prallplatte h steuert an der Drosselstelle g den konstanten Luftstrom der Leitung e, der je nach dem Strömungswiderstand an der Drosselstelle einen mehr oder weniger großen Druck auf f und

das Steuerglied b hervorruft.

Mathematische Betrachtung: Genau wie die Regelstrecke, ist auch der Regler durch eine Übergangsfunktion gekennzeichnet. Sie erfaßt den Bewegungslauf des Stellgliedes in der Zeit, bei sprunghafter Änderung des Sollwertes.

Beim idealen P - Regler hat die Kurve einen Verlauf, wie in Abbildung 21 a. Dieser Fall kann annähernd mit Elektronenröhren er-

reicht werden. Form b liegt vor, wenn eine Zeitkonstante (Verzögerungsglied) des Reglers die anderen bei weitem überwiegt. Sie kommt vor bei pneumatischen und elektrischen Reglern.

In c steckt eine stark gedämpfte Eigenschwingung (Meßwerk, Manometer, Steuerkolben, Membranventile).

Schließlich kann eine Überlagerung der Formen b und c vorkommen, oder es können sich, was gleichfalls höchst selten ist, zwei stark gedämpfte Schwingungen in der Übergangsfunktion abzeichnen. (d)

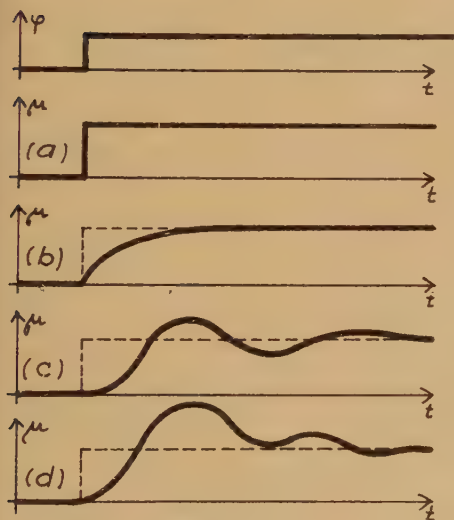


Abb. 21

Die P - Regler können im Rahmen ihres Anwendungsgebietes meist als verzögerungsfrei angesehen werden.

Kennzeichnend für den P - Regler ist neben seiner Übergangsfunktion auch noch sein Regelfaktor R. Dieser Faktor gibt an, auf den wievielten Teil eine Störgröße durch den Regler vermindert wird. R ist üblicherweise in der Größenordnung 0,1 - 0,01. Der Regelfaktor errechnet sich aus der Gleichung
$$R = \frac{1}{1 + V_S \cdot V_R}$$

V_S ist dabei die Verstärkung der Strecke (s. S. 27), V_R die Verstärkung des Reglers (s. S. 42). Bei verzögerungsfreien P - Reg-

lern ist die Meßgröße, gemessen in Einheiten der Regelgröße oder in neutralen Einheiten, die unabhängige Veränderliche und die Stellgröße die abhängige.

Der F - Regler ist, wie beschrieben, dadurch gekennzeichnet, daß jeder Regelgröße nur 1 Stellgröße $x_p \cdot y$ zugeordnet ist. (x_p = Proportionalbereich s. S. 42; y = Abweichung der Stellgröße von ihrem Bezugspunkt). Nach beendetem Regelvorgang bleibt eine Regelabweichung von der Größe: $-x = x_p \cdot y$ bestehen. Das Maß dafür ist der Proportionalbereich.

Der I - (integral wirkende) Regler

Beim integral wirkenden Regler oder I - Regler ist die Stellgröße dem Zeitintegral über der Regelgröße proportional. Der Regler besitzt Geschwindigkeitszuordnung und wurde früher astatischer Regler genannt.

Auch mit Hilfe des I - Reglers ist es möglich, den Druck einer Flüssigkeit a zu regeln, wie Abb. 22 zeigt. Das Meßwerk wird wie-

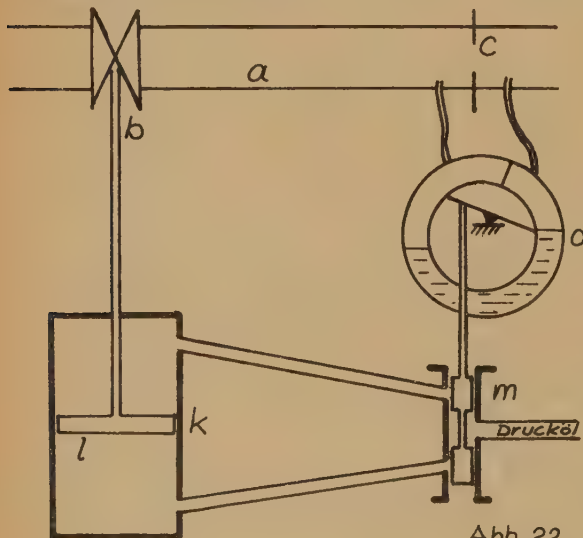


Abb. 22

der gebildet von der Ringwaage d, die den Regelimpuls direkt an den Steuerkolben m weitergibt. Dieser ist eine Art Zweiwegebahn, mit dem ein unter bestimmtem Druck stehender Flüssigkeitsstrom auf 2 Teilräume eines Zylinders geschaltet werden kann. Der Kolben l des Zylinders steht in Verbindung mit einer Drossel e, die nun den Druck in der Regelstrecke beeinflusst.

Masse und Reibung seien vernachlässigt. In erster Näherung ist die je nach Zeiteinheit in einen Zylinderteil strömende Menge des Drucköls der Auslenkung des Steuerkolbens aus der Mittellage verhältnismäßig. In dem Maß, wie der eine Teil gefüllt wird, wird der andere durch eine nicht gezeichnete Vorrichtung entleert. Daher ist die Geschwindigkeit, mit

der der Kolben 1, also auch das Steuerglied sich bewegt, der Auslenkung des Steuerkolbens aus der Mittellage proportional. Dieser Regler besitzt Geschwindigkeitszuordnung zwischen Regel- und Stellgröße.

Durch den I - Regler wird die Stellgröße vollständig ausgeregelt, während beim P - Regler eine Regelabweichung vom Sollwert verbleibt um das Stellglied gegen den Zug der Rückstellfeder 1 (Abb. 20) in der neuen korrigierenden Stellung zu halten. Eine Abweichung vom Sollwert tritt bei I - Reglern nur während des Regelvorganges auf, und zwar proportional der Geschwindigkeit.

Der I - Regler kann Verzögerungen erleiden, z. B. durch die Trägheit der Ringwaage. Dabei kann der Hauptkolben über die zur Ausregelung erforderliche Lage hinausgehen. So entstehen Schwingungen im Regelkreis.

Kennzeichen des Reglers: Wie die P - Regler, so haben auch die einzelnen I - Regler voneinander abweichende Übergangsfunktionen.

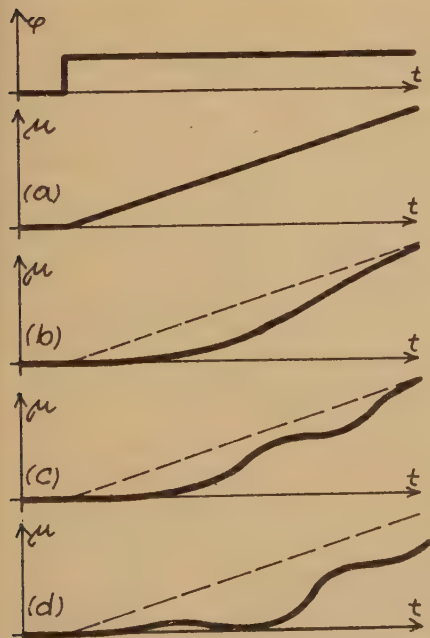


Abb. 23

Abb. 23 a zeigt den Idealfall; b, c und d sind die Funktionen für I - Regler, bei denen Masse bzw. Trägheitsmoment nicht vernachlässigbar sind. φ bedeutet wieder plötzliche Veränderung der Regelgröße, μ die dazugehörige Stellgrößenänderung.

Stellgeschwindigkeit. Der echte Integralregler treibt das Stellglied mit einem Motor an, dessen Geschwindigkeit der Regelabweichung der Meßgröße proportional ist. Man kennzeichnet den Regler durch die Stellgeschwindigkeit, welche auf die Einheit der Regelgröße bezogen wird.

Ist die Stellgeschwindigkeit auf die Einheit der Regelgröße bezo-

gen, so spricht man von der bezogenen Stellgeschwindigkeit C_R . Wird z. B. ein pH - Wert um 2 pH verändert und das Ventil bewegt sich mit $1,5 \text{ mm/s} = 90 \text{ mm/min}$, so ist die bezogene Stellgeschwindigkeit $C_R = 45 \frac{\text{mm}}{\text{min.pH}}$

GröÖste Stellgeschwindigkeit. Gelegentlich ist es nützlich, die grÖÖste Stellgeschwindigkeit zu kennen. Sie gibt ein MaÖ für die Zeit, in der bei besonders starken StÖrungen der volle Eingriff des Reglers erfolgt. Ob sie ausgenutzt werden kann, hängt von den Stabilitätsverhältnissen des Kreises ab.

Stellzeit. Die Stellzeit ist die Zeit, die mit der Einheit der RegelgrÖÖe gebraucht wird, um das Stellglied seinen ganzen Bereich oder Hub durchlaufen zu lassen. Sie ist: $y_{\text{max}} / C_R = \text{Stellzeit}$

Der P - I - Regler

Ein P - Regler und ein I - Regler mit gemeinsamem MeÖwertgeber seien an ihren Ausgängen durch Gestänge, Differentialgetriebe oder dergleichen kinematisch gekoppelt. Sind beide Regler ideal, so addieren sich ihre Übergangsfunktionen.

Nächstellzeit. T_n Der P - I - Regler wird gekennzeichnet durch die Nachstellzeit (siehe Abbildung 24). Das ist die Zeit, um die der Beginn des Regeleingriffs vorverlegt werden müÖte, wenn er mit rein integraler Wirkung die Übergangsfunktion der Kombination erreichen sollte.

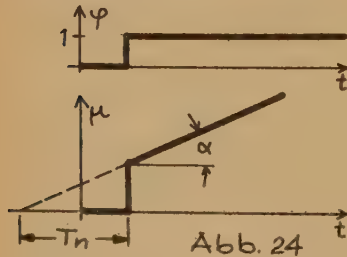


Abb. 24

$$T_n = V_R / C_R$$

Schema eines Proportional - Integral - Reglers.
1 und 2 sind das proportionale und das integrale Glied.
 r_0 und r_1 bedeuten Konstante, die sich bei der Berechnung ergeben. φ sei wieder die

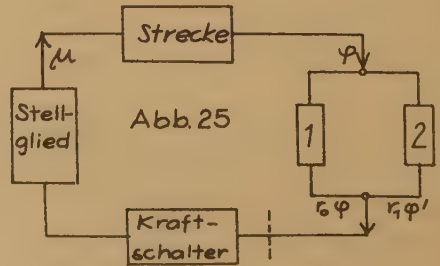


Abb. 25

plötzliche Veränderung der Regelgröße, die sich auf 1 und 2 in dem Verhältnis $r_0 \varphi$ und $r_1 \varphi'$ verteilt. φ' ist die 1. Ableitung von φ .

P - D - und P - I - D - Regler

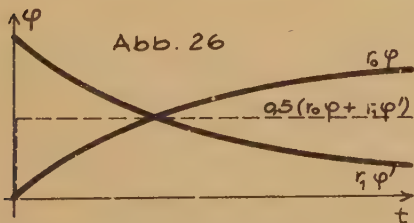
Alle Regelstrecken, bei denen die gesamte Verzögerung zwischen dem Eintritt einer Störung und ihrer völligen Auswirkung am Fühler vernachlässigbar klein ist gegen die Zeitkonstanten des Reglers, können mit dem P - oder dem I - Regler geregelt werden. Dann bestimmt der Regler die Zeit, die für die Ausregelung erforderlich ist, sowie den Verlauf des Regelvorganges.

Strecken 1. Ordnung (das sind Strecken, deren Verhalten durch eine Übergangsfunktion 1. Ordnung beschrieben werden kann und die nur eine vernachlässigbare Verzögerung besitzen) sind immer, solche 2. Ordnung oft mit den genannten Reglern stabil. Die Schwingungsdauer der Regelkreise ist durch die Zeitkonstante der Strecke in ihrer Größenordnung festgelegt.

Will man bei Strecke höherer Ordnung, mit Anlaufzeit und Totzeit, aufklingende Schwingungen im Regelkreis vermeiden, so muß man eine langsame Regelung in Kauf nehmen. Schnelle und exakte Regelung bildet stets einen Gegensatz zur Stabilität des Kreises. Je steiler die Übergangsfunktion der Strecke ist, desto besser kann die Leistungsfähigkeit eines schnellen Reglers ausgeschöpft und die Regelabweichung nach Größe und Dauer vermieden werden.

Diese Aufgabe wird unter günstigen Bedingungen durch die Einführung des Differentialquotienten der Regelgröße in den Regelkreis gelöst. Dem Kraftschalter werden dabei die Meßgröße und ihre zeit-

liche Ableitung zugeleitet, die summiert eine Übergangsfunktion mit geringerer Verzögerung ergeben, als sie die Ausgangsfunktion besaß. Voraussetzung für eine günstige Beeinflussung der Übergangsfunktion der Strecke ist die Wahl der geeigneten Zeitkon-



stanten r der Ableitung. (Abb. 26) Zeichenerklärung wie in Abb. 25

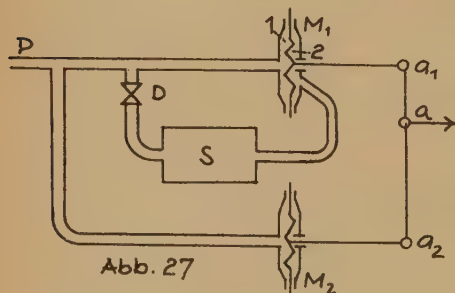
War die Ausgangsgleichung eine Funktion erster Ordnung, so ist die Verzögerung durch eine Ableitung völlig auszugleichen. In Strecken n - ter Ordnung können sämtliche Verzögerungen eliminiert werden, wenn von der Regelgröße auch die höheren Ableitungen (von der 1. bis zur n - ten) gebildet werden. Wegen des technischen Aufwandes hat sich dieses Verfahren jedoch nicht eingeführt.

Das Verhältnis der Konstanten der Regelgröße und ihrer Ableitung bestimmt die Dosierung des Vorhaltegliedes.

Der differenzierende Meßwertumformer kann den Eingang eines P-, aber auch eines P - I - Reglers bilden. Die solchermaßen ergänzten Regler werden P - D - bzw. P - I - D - Regler genannt.

Verzögerungen des Reglers. Verzögerungen des Reglers müssen durch größeren Proportionalbereich und kleinere Stellgeschwindigkeit des Reglers ausgeglichen werden. Durch das Vorhalteglied können jedoch im Regler Verzögerungen bis zu einem gewissen Grade kompensiert werden.

Als Beispiel für einen P - D - Regler soll ein als Luftdruckvario-



meter bekanntes Gerät beschrieben werden. Die Regelgröße ist der Druck p . Sie wird durch das Membranmanometer M_1 in eine Auslenkung a_1 umgewandelt. Ist die Drossel D geschlossen, also der Druck m der Kammer 2 konstant, so wird bei einer sprunghaften Änderung von p auch a_1 sehr schnell auf einen neuen Wert

gehen. Wird umgekehrt die Kammer 1 abgetrennt und D geöffnet, so steigt bei demselben Sprung von p der Druck in der Kammer 2 allmählich, sobald sich der Speicher S gefüllt hat, auf einen neuen Wert an. Dabei wirkt er dem in der Kammer 1 herrschenden Druck entgegen, und es ergibt sich für a_1 die nebenan dargestellte Übergangsfunktion. Masse und Reibung sind hier vernachlässigt.

Unter denselben Voraussetzungen erhält man für die Auslenkung a_2

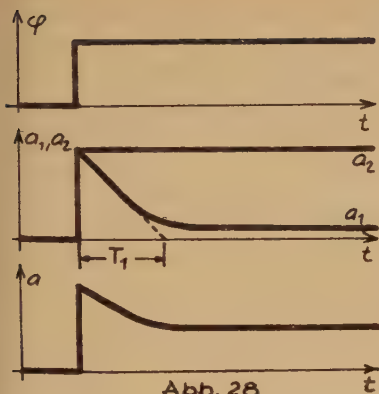


Abb. 28

Wirkung des D - Gliedes
beim P - I - D - Regler

am Ausgang des Manometers M_2 den gezeichneten Verlauf (Abb. 28) und die Summation über das Gestänge gibt die Reglerausgangsgröße des differenzierenden Meßgerätes a . Von einer echten "Differenziation" des Druckes ist dabei allerdings keine Rede, selbst wenn T_1 (Tangente an a_1 im Augenblick der Störung schneidet auf der Abszisse die Zeit T_1 ab) sehr klein gemacht wird.

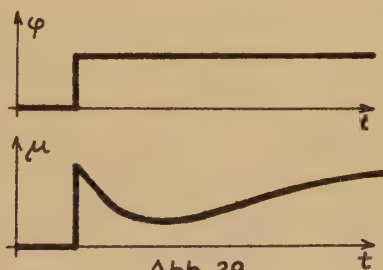


Abb. 29

Kennwerte für Regler mit Vorhalteeinfluß

Zur Charakterisierung des Vorhalteeinflusses beim differenzierenden Regler eignet sich die Übergangsfunktion bei ruckartiger Meßgrößenänderung schlecht. Die Meßgröße ändert sich doch meist vom Sollwert aus mit einem zeitproportionalen Anstieg. Diesen Anstieg kann man als Anstiegsfunktion bezeichnen. Der durch ihn verursachte zeitliche Ablauf der Stellgröße wird für einen verzögerungsfreien P - D - Regler mit Meßwerk der ausgezogenen Kurve entsprechen. (Abb. 30)

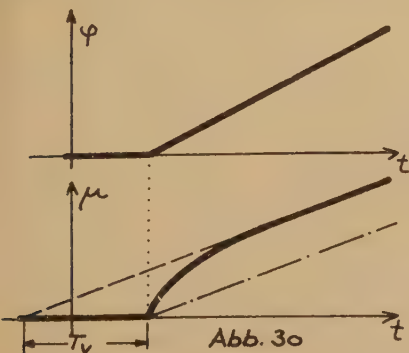


Abb. 30

Ein P - Regler ohne Vorhalt würde sich so verhalten, wie es die punktierte Kurve angibt. Nach Abklingen des Ausgleichsvorganges verlaufen beide Kurven parallel. Die Verlängerung dieser beiden Kurven bis zum Schnittpunkt mit der Abszisse schneidet auf dieser die Zeit T_v ,

die sogenannte Vorhaltezeit des Reglers ab. Die Zeit T_v ist auch der horizontale Abstand zwischen der Zeitfunktion ohne Vorhalt und derjenigen mit Vorhalt nach Beendigung des Ausgleichsvorganges.

Nachstellzeit und Vorhaltezeit eines Reglers dürfen nicht verwechselt werden. Die Nachstellzeit des P - I. - Reglers wird an der Übergangsfunktion gemessen, die Vorhaltezeit des P - D - Reglers an der Zeitfunktion der Stellgröße, wenn die Meßgröße linear ansteigt.

Der P - Z - Regler

Unter P - Z - Regler versteht man einen Regler mit sogenannter Störgrößenaufschaltung.

Soll, wie z. B. bei der Abwasserbeseitigung in einer strömenden Flüssigkeit der pH - Wert geregelt werden, so kann die Aufgabe gelöst werden, durch eine ständige pH - Messung, deren Ergebnis als Regelimpuls verwendet wird.

Ändert sich nun die Strömungsgeschwindigkeit der Abwässer, so paßt sich der Regler diesen veränderten Bedingungen nicht an. Er erhält erst dann einen Regelimpuls, wenn der Wasserstoffionengehalt der Flüssigkeit vom Sollwert abgewichen ist. Die Regelfläche (vergl. S. 33, Abb. 16) wird darum ziemlich groß und der Wert der Regelung ist stark herabgesetzt.

Eine grundsätzlich andere Lösungsmöglichkeit der vorgegebenen Aufgabe ergibt sich, wenn die Störgrößen (also hier die veränderliche Strömungsgeschwindigkeit), die eine Regelabweichung verursachen, gemessen und als Anregungsgrößen für die Regelung ausgewertet werden können.

Ist eine Störgröße durch Messung genau erfaßbar, so gibt es 2 Möglichkeiten, sie als Regelimpuls auszuwerten:

1. Die Störgröße z wirkt, ohne Umweg über den Regler, direkt und ohne zeitliche Verzögerung im richtigen Sinn auf die Regelstrecke ein. Auf die strömende pH - Regelstrecke bezogen, wird also von dem Geschwindigkeitsmesser direkt die Zufuhr von Reagens zur Re-

gelstrecke gesteuert.

Diese Störgrößenaufschaltung am Stellglied der Regelstrecke hat den Zweck, die eigentliche Regelung zu entlasten und den erforderlichen neuen Wert der Stellgröße schneller wieder herzustellen, als es mit der P - oder I - Regelung alleine möglich wäre.

2. Die Störgröße (bzw. eine von mehreren Störgrößen) wirkt als zusätzliche Anregungsgröße auf das Meßwerk des Reglers ein. Diese Art der Störgrößenaufschaltung stellt eine gewisse Lastabhängigkeit der Regelgröße her.

Vorteile der Störgrößenaufschaltung

Bei größeren Verzögerungen in der Regelstrecke und im Regler, insbesondere beim Vorhandensein von Totzeiten und bei Regelstrecken ohne Ausgleich, wird die Regelung um so schwieriger, je verzögerungsfreier sich die Störgrößen auf die Regelgrößen auswirken. Die Störgrößen sind hinsichtlich der Intensität und Schnelligkeit ihrer Einwirkung auf die Regelstrecke verschieden. Ein genaues Bild hinsichtlich des Störverhaltens gewinnt man durch Aufzeichnen der Stör - Übergangsfunktion der Regelstrecke, d. i. der zeitliche Verlauf der Regelgröße bei sprungartiger Änderung einer Störgröße.

Mit der Störgrößenaufschaltung kann das Problem der schnellen und genauen Regelung von schwierigen Regelstrecken im allgemeinen auch dann gelöst werden, wenn mit Dämpfung, Rückführung oder vorgreifender Regelung durch Erfassung der Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße kein befriedigendes Ergebnis zu erzielen ist. Die Auffindung und Messung von Störgrößen und ihre Aufschaltung an der richtigen Stelle des Regelkreises unter Beachtung der richtigen Anpassung ermöglicht eine grundsätzliche Weiterentwicklung der Regelkreise.

In Fall 1 ist durch die Störgrößenaufschaltung eine schnellere und stabilere Regelung bei gleichzeitiger Entlastung des Reglers zu erzielen. Beim P - Regler bedeutet diese Entlastung auch eine Verkleinerung des Proportionalbereiches und damit eine Erhöhung

der Regelgenauigkeit. Der Regler hat dann nur noch die Aufgabe der Feineinstellung.

In manchen Fällen bietet die Störgrößenaufschaltung eine Möglichkeit, den Regler vor Auftreten einer Regelabweichung zum Eingreifen zu bringen, ohne die Stabilität des Regelkreises zu beeinträchtigen. Dies ist vor allem in den Fällen wichtig, wo die Störübergangsfunktion der Regelstrecke eine Totzeit aufweist. Es kann also vor allem die auf eine Störung folgende anfängliche Regelabweichung herabgesetzt werden, was mit keiner anderen Methode möglich ist.

Als Beispiel diene wieder die pH - Regelung einer strömenden Flüssigkeit. Schaltet man Änderungen der Strömungsgeschwindigkeit auf den Regler, so wirkt die Laststromänderung über den pH - Regler auf die Reagenszufuhr, nicht aber auf die Strömungsgeschwindigkeit zurück, da das Stellglied nicht auf die Störung zurückwirkt. Die Störgrößenaufschaltung vollzieht sich also nicht in einem geschlossenen Kreis und kann daher die Stabilität der Regelung nicht gefährden.

Unterschied zwischen Störgrößenaufschaltung und Rückführung

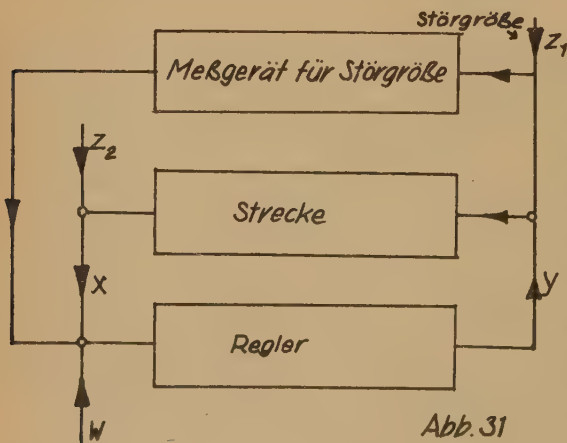


Abb. 31

Schema der Regelstrecke mit
Störgrößenaufschaltung

Störgrößenaufschaltung und Rückführung beeinflussen zusätzlich das Meßwerk oder das Stellglied oder beide zum Zwecke der Erhöhung der Schnelligkeit, Stabilität und auch Genauigkeit der Regelung. Der grundsätzliche Unterschied ist der, daß bei der Störgrößenaufschaltung die Beeinflussung von außerhalb des Regelkreises kommt, während sie bei der Rückführung aus

dem Regelkreis selbst heraus geholt wird. Ein grundsätzlicher Vorteil der Störgrößenaufschaltung gegenüber der Rückführung ist dadurch gegeben, daß die Störgrößenaufschaltung weitgehend die Regelung ersetzen, d. h. die Regelgröße konstant halten kann, wobei der Regler entweder entlastet wird oder überhaupt nicht einzugreifen braucht. (Abb. 31)

Der geschlossene Regelkreis mit stetig wirkenden Reglern

Stabilitätsfragen

Gleichung des Regelkreises

Für die Praxis ist es wichtig, feststellen zu können, welcher Regler eine gegebene Regelstrecke am genauesten regeln kann. Die Antwort auf diese Frage gibt die Differentialgleichung des Regelkreises. Sie wird aufgestellt aus den Differentialgleichungen der Strecke und des Reglers durch Eliminieren eines gemeinsamen Gliedes, z. B. μ . Die Gleichung stellt den Verlauf der Veränderlichen des Regelkreises, z. B. der Regelabweichung bei einer Störung des stationären Zustandes der Regelstrecke, in Abhängigkeit von der Zeit dar. Die Übergangsgleichung des Regelkreises gleich Null gesetzt, ergibt das Verhalten des Kreises, wenn er sich selbst überlassen bleibt.

Stabile und instabile Vorgänge, Pendelungen

Ein Regelvorgang verläuft stabil, wenn er zu einem stationären Zustand der Regelstrecke führt, sonst verläuft er instabil.

Schwingungen, die nicht zu einem stationären Zustand der Regelstrecke führen, also Schwingungen mit gleichbleibender oder anwachsender Amplitude, werden Pendelungen genannt.

Pendelungen sind im allgemeinen unzulässig, doch treten sie z. B. bei den Auf- Zu- Reglern zwangsläufig auf.

Verzögerung in der Regelstrecke als Ursache für die Instabilität des Kreises

1. Eine ideale Regelstrecke (verzögerungsfrei) und ein gleichfalls

idealer P - Regler werden zusammengeschaltet. Betrachtet man das

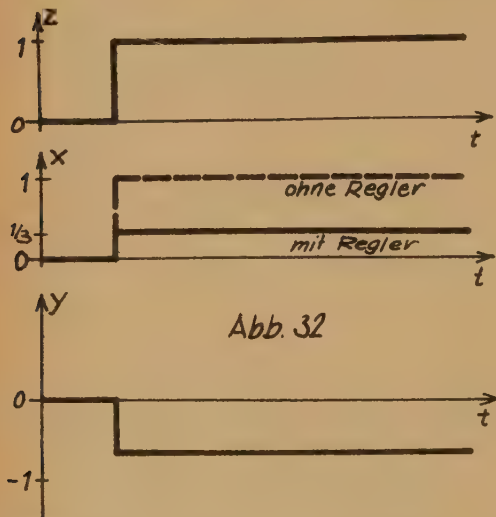


Abb. 32

Stellglied erzeugt. Das Zusammenschalten von Regler und Strecke ergibt: $x = 1/3$, $y = 2/3$, die Störung wird also auf 33 % vermindert; der sogenannte Regelfaktor ist 0,33.

2. Bei der gleichen Strecke wird ein I - Regler verwendet, siehe

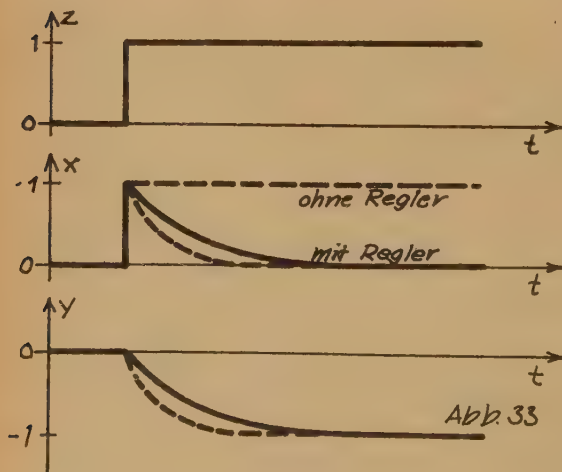


Abb. 33

Abb. 33. Die Neigung der Kurve $y(t)$ ist in jedem Augenblick proportional der Regelabweichung. Im ersten Augenblick erscheint die Störgröße z voll am Ausgang als x , dann beginnt der Abbau, und schließlich nähert sich y dem Wert -1 , so daß die Störung $z = +1$ völlig beseitigt wird. Erteilt man dem Stellmotor für $x = 1$ die vierfache Geschwindigkeit, so läuft der Vorgang nach

den punktierten Kurven ab.

3. Das Verhalten der Regelstrecke mit Totzeit. (s. Abb. 34) In einem Mischgefäß soll durch Mischung eines sauren und eines ba-

sischen Anteils ein Produkt bestimmter Azidität hergestellt werden. Da es nicht möglich ist, den Zufluß und die Konzentration (zwei Hauptstörrquellen) der sauren Komponente konstant zu halten, wird in die zweite Rohrleitung ein vom Regler betätigtes Ventil gelegt. Der Fühler

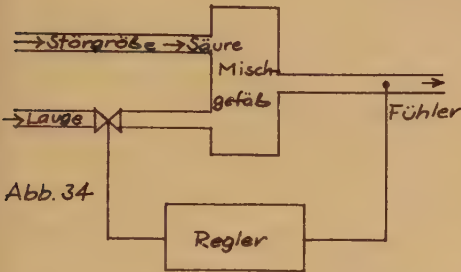


Abb. 34

mißt etwa die Wasserstoffionenkonzentration mit Hilfe der EMK einer Elektrodenkette. Aus technischen Gründen sei der Fühler in einiger Entfernung vom Mischgefäß angebracht. Verzögerungen, wie sie bei Druckregelstrecken durch Strömungswiderstände und Speichervolumen auftreten, seien nicht vorhanden, ebensowenig solche durch die Mischung der beiden Komponenten, da die Diffusion durch ein Rührwerk sehr beschleunigt werden kann.

Wird für diese Strecke wieder ein P - Regler mit dem Empfindlichkeitsfaktor $y/x = -2$ verwendet, so ergibt sich ein Vorgang wie

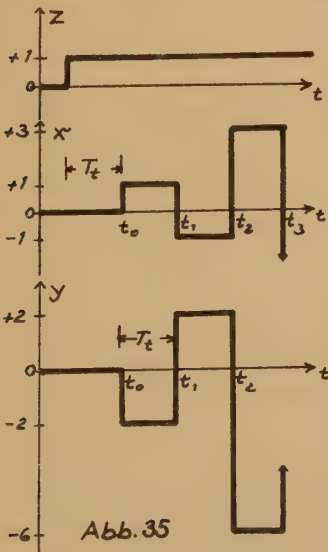


Abb. 35

in Abb. 35, der von der Kurve mit der idealen Regelstrecke sehr wesentlich abweicht. Befindet sich nämlich der Fühler in einiger Entfernung vom Mischgefäß, so dauert es u. U. geraume Zeit, bis sich die Folge einer Verstellung am Fühler bemerkbar macht. Sie ist gleich der Strömungsgeschwindigkeit mal der Entfernung zwischen Stellglied und Fühler. Somit erzeugt eine Störung $z = 1$ eine Regelabweichung $x(t_0) = 1$ und eine Stellgröße $y(t_0) = -2$, gerade als ob der Regelkreis am Stellglied offen wäre. Zwar wird sogleich im Zeitpunkt (t_0) der Durchfluß der Lauge geändert, aber der Fühler erhält erst davon Kenntnis, wenn das veränderte

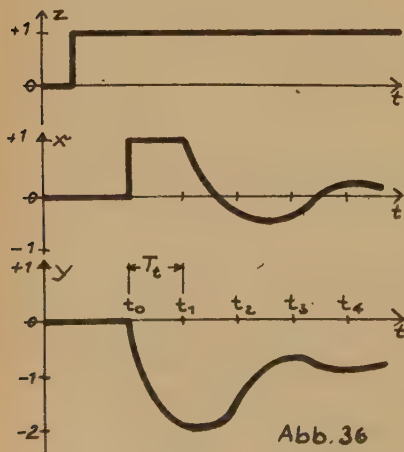
Gemisch bei ihm ankommt, also nach der Laufzeit oder "Totzeit" T_t . Bei der idealen Regelstrecke waren die Bedingungen $x = z + y$ und $y = -2x$ gleichzeitig zu erfüllen - weil nirgends eine Verzögerung vorlag - und das führte auf die eingetragenen Zahlenwerte, insbesondere $x_{\text{mittel}} = 1/3$. Hier hingegen wird zunächst

$$x(t_1) = z + y(t_1) = +1 - 2 = -1$$

d. h. statt einer Regelabweichung nach oben tritt eine gleich große nach unten ein. y wird $+2$, wirkt also nach derselben Seite wie die Störgröße: der Sinn der Regelung ist ins Gegenteil verkehrt. Nach einem weiteren Totzeitintervall, nämlich bei t_2 , wird

$$x(t_2) = z + y(t_2) = +3$$

Sogleich springt y auf -6 , welcher Wert bis t_3 stehen bleibt usw. Die kleinste auch zufällige Abweichung vom Gleichgewichtszustand führt zu einer sich aufschaukelnden Schwingung mit der Periodendauer $2 T_t$. Zwar strebt die Schwingweite - durch die bisher nicht berücksichtigten Eigenschaften der Strecke oder den begrenzten Hub des Stellgliedes - einem festen Wert zu, doch können selbst bei mäßiger Amplitude verheerende Folgen auftreten. Eine Instabilität ist schlimmer, als gar keine Regelung. Ein P - Regler ohne Verzögerung mit einem Empfindlichkeitsfaktor $y/x = -1/2$ gibt gerade keine anschwellenden Schwingungen mehr. Gerade das schnelle Eingreifen des P - Reglers hat die Anfachung der Regelschwingungen veranlaßt.



Kombiniert man einen I - Regler mit der gleichen Strecke, so ergibt sich ein Vorgang nach Abb. 36. Zur Zeit t_0 , wenn der Fühler anspricht, beginnt der Stellmotor aus der Stellung 0 heraus zu laufen, und zwar - solange x konstant ist - mit konstanter Geschwindigkeit. Daher wächst y von t_0 bis t_1 linear mit der Zeit und erreicht den Wert $-1,5$. Zur Zeit t_1 kommt am Fühler die Front des inzwischen laufend veränderten Gemisches an; die x - Kurve ist ähnlich der y -

Kurve im vorangehenden Intervall. Wenn nun zwischen t_1 und t_2 die Regelabweichung über Null hinaus abfällt, muß dasselbe für die Geschwindigkeit des Stellmotors, also dy/dt , gelten: der Stellmotor wird zunehmend langsamer und schließlich umgesteuert, so daß bei t_2 die vorher bestehende Überregelung z. T. wieder beseitigt ist. Dies wird durch die weiteren Kurventeile dargestellt. Bei der angenommenen Stellgeschwindigkeit von $-1,5/T_t$ für $x = 1$ ist die Regelung nicht schlecht. Der Vorgang ist nach $6 T_t$ praktisch beendet.

Ist die Stellgeschwindigkeit wesentlich größer, so wird die Dämpfung der Regelschwingung geringer, die Ausregelungsdauer also länger oder der Kreis wird instabil. Bei beträchtlich kleinerer Stellgeschwindigkeit schwingt x von der Zeit t_1 ab überhaupt nicht mehr ins Negative, sondern kriecht unter kleinen Pendelungen gegen Null, was gleichfalls ungünstig ist.

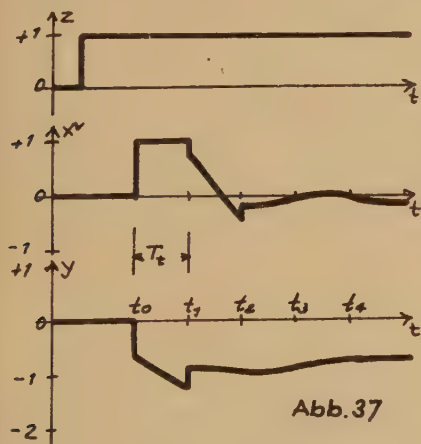


Abb. 37

Bei der Kombination der Strecke mit einem P - I - Regler wird zur Zeit t_0 einerseits y vom 0 auf $-0,5$ sprunghaft verlagert; zusätzlich beginnt ein zeitproportionaler Anstieg mit der Geschwindigkeit $dy/dt = -0,8/T_t$ für $x = 1$. Für das angenommene Beispiel ist die Ausregelung der Störung bereits nach $3 T_t$ praktisch abgeschlossen.

Regelschwingungen

Die Regelschwingung, genauer gesagt, der zeitliche Verlauf der Regelabweichung unter dem Einfluß einer Störgröße ist nicht leicht in ein Schema einzuordnen. So ist auch die Übergangsfunktion nur als eine Annäherung zu betrachten. Trotzdem kann man aus ihrem Verlauf viele Schlüsse auf die Eigenschaften des Regelkreises

ziehen. Man betrachtet dazu Anfangs-, Mittel- und Schlußteil der Kurve gesondert.

Der Schlußteil wird durch den Regler allein bestimmt. Die bleibende Regelabweichung ist bei Reglern mit integraler Wirkung Null, bei proportional wirkenden Reglern endlich und aus den Kennwerten V_S und V_R zu berechnen.

Der Anfang ist oft ein komplizierter Ausgleichsvorgang, der nicht nur durch die Eigenschaften der Strecke und des Reglers, sondern auch durch den Angriffspunkt der Störgröße bestimmt wird. Ein relativ träger Regler ändert am Beginn der Regelabweichung nicht viel, ganz gleich, wo die Störung eintrifft.

Wirkt eine Störgröße am Eingang der Strecke, so wird sie zunächst gemäß den Eigenschaften der Strecke verflacht, verschliffen oder verzögert. Maßgebend für den Beginn des Regelungsvorganges ist im wesentlichen die Übergangsfunktion der Strecke.

Tritt die Störgröße am Ausgang der Strecke in der Nähe des Fühlers auf, so wirkt sie sich zunächst voll auf die Regelabweichung aus - als ob der Regler gar nicht vorhanden wäre - und wird dann gemäß der Übergangsfunktion des offenen Kreises abgebaut. Störungen dieser Art sind unangenehmer und stellen höhere Anforderungen an den Regler, als Störungen am Eingang der Strecke.

Die Größe der maximalen Regelabweichung ist mit einiger Genauigkeit nur zu berechnen, wenn die Lösung der Differentialgleichung des Kreises vorliegt. In ungünstigen Fällen ist die Regelabweichung, die ohne Regler gemessen wird, gleich. (z. B. bei Störung in der Nähe des Fühlers oder bei trägem Regler, der etwa bei Strecken mit Totzeit aus Gründen der Stabilität erforderlich ist.)

Der mittlere Abschnitt des Regelungsvorganges ist entweder eine gedämpfte Schwingung oder ein aperiodischer, exponentiell abklingender Verlauf. Theoretisch ist der Vorgang, wenn man von Haftreibung bei mechanischen Systemen absieht, erst nach unendlicher Zeit zu Ende. Praktisch wird man den Vorgang als abgeschlossen

betrachten, wenn der endgültige Zustand bis auf einige Prozent der größten Abweichung erreicht ist.

Maßgeblich für den Wert einer Regelung ist die Überschwingweite (= größter Wert der vorübergehenden Regelabweichung) und die effektive Dauer. Ein Maß dafür ist der Kehrwert des Produktes der beiden Größen.

Dämpfungsgrad

Ein Maß für die Güte der Regelung ist der Dämpfungsgrad der nach einer Störung im Regelkreis entstandenen Schwingungen.

Beim I - Regler ist der Dämpfungsgrad lastabhängig. Er wird mit sinkender Last kleiner (kleinerer Ausgleichsgrad q). Um trotzdem Stabilität im Regelkreis zu behalten, muß die Stellzeit des Stellgliedes vergrößert werden.

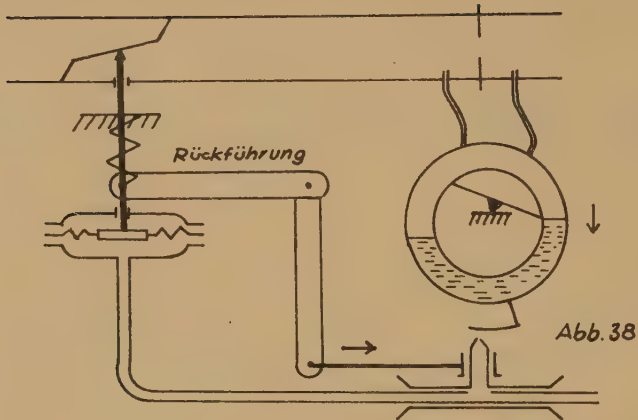
Der Dämpfungsgrad beim P - Regler ist lastunabhängig.

Anm. Mit dem Dämpfungsgrad nicht zu verwechseln ist das Verhalten der Regelgröße nach einer Störung. Hier arbeitet der I - Regler lastunabhängig; er führt den Meßwert genau auf den Sollwert zurück. Der P - Regler hingegen zeigt Lastabhängigkeit.

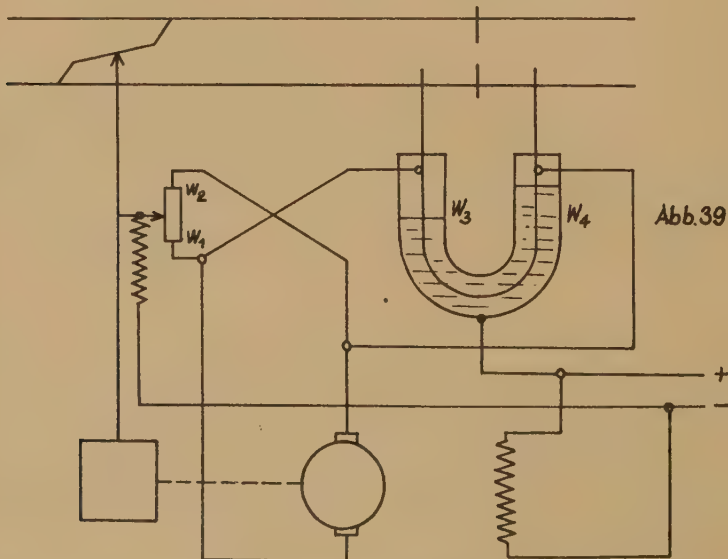
Rückführung

Prinzip

Alle bisher betrachteten Regelkreise zeichneten sich dadurch aus, daß eine Änderung des Zustandes an irgend einer Stelle in einer Richtung um den Kreis herum lief, weil alle Teile nur in einer Richtung übertrugen und keine Abzweigungen vorhanden waren. Bei der Rückführung kommt neu hinzu eine Verbindung vom Stellglied nach dem Meßwertgeber, welche wiederum nur in einer, eben dieser, Richtung wirken soll und sehr verschiedenartig aussehen kann. In Abbildung 38 ist z. B. am Stößel des Membranventils ein Hebel anlenkt, der die ursprünglich ortsfeste Drosselstelle g in Bild 38 proportional dem Ventilhub verschiebt.



In Bild 39 wird durch einen mit dem Stellglied verbundenen Schleifkontakt das Verhältnis w_1/w_2 geändert.



Eine solche einseitige Kopplung vom Regler-Ausgang (Stellglied) nach dem Reglereingang (Meßwertgeber) wird als Rückführung bezeichnet. Dieses neue Element macht im wesentlichen dauernd oder befristet einen Teil der Wirkung des Reglers rückgängig.

ne Energiequellen und besteht aus wenigen, zeitlich unveränderlichen Teilen. Wenn es also gelingt, die Eigenschaften des Reglers auf das Rückwärtsglied allein abzustellen, so ist damit zweifellos ein erheblicher Fortschritt im Hinblick auf Eichfähigkeit und Betriebssicherheit erreicht. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine erhebliche Reserve - in gewissem Sinn auch eine Überdimensionierung - im Vorwärtsglied.

Die stabilisierende Wirkung einer Rückführung kann nicht erreicht werden, wenn sie an einen vorhandenen Regler angebaut wird, welcher gerade die für seinen Verwendungszweck erforderliche Verstärkung bzw. Stellgeschwindigkeit aufweist. Entweder muß die Rückführung sehr schwach eingestellt werden, dann ist sie so gut wie wertlos; wird dagegen ihr Einflußgrad so groß gemacht, daß sie das Verhalten wesentlich bestimmt, dann ist der Regler praktisch verdorben, denn er ist träge oder unempfindlich geworden. Im allgemeinen muß also die Konstruktion eines Reglers auf die Verwendung einer Rückführung zugeschnitten sein.

b) Zur Änderung des Charakters eines Reglers

Es ist dabei möglich, etwa einen reinen I - Regler durch die geeignete Rückführung zu einem Regler mit proportionaler Wirkung zu machen usw.

c) Als Stabilisierungseinrichtung, s. S. 39

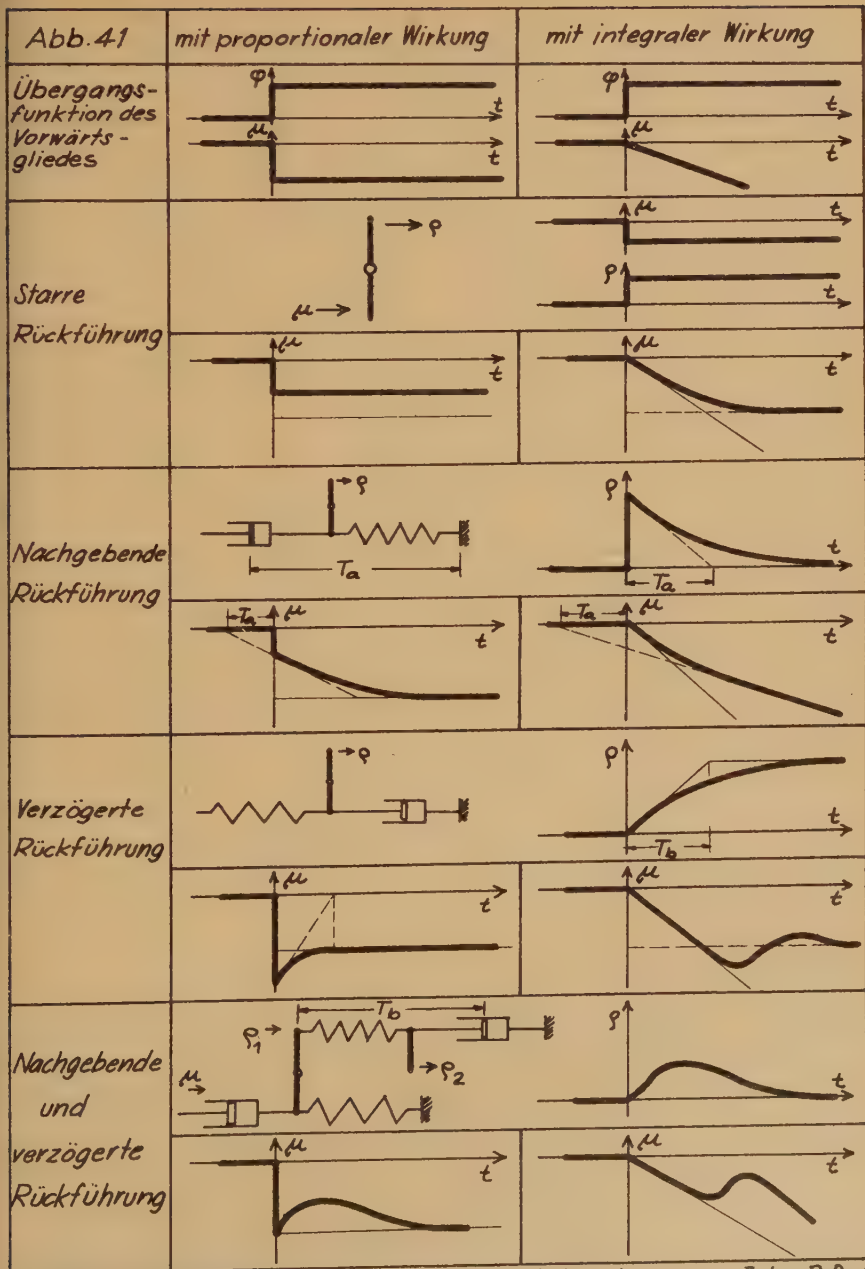
Arten der Rückführung

Die starre Rückführung

Im Idealfall bewirkt die starre Rückführung das Verhalten eines reinen P - Reglers, dessen Verstärkung nur vom Einflußgrad der Rückführung abhängt. In jedem anderen Fall ergibt sich ein P - Regler mit größerer oder kleinerer Verzögerung. Am anschaulichsten zeigt das die Abbildung 41 a für den P - Regler und den I - Regler.

Die nachgebende Rückführung

Die nachgebende Rückführung entsteht aus der starren durch Einfügung eines Übertragungsgliedes, welches schnelle Änderungen der



Die dünn ausgezogenen Linien — geben den Verlauf bei reinem J- bzw. P-Regler.

Eingangsgröße voll, langsame weniger überträgt. Ein Ausführungsbeispiel dafür zeigt Abb. 41 b. Ein an eine Feder gehängter Bremswiderstand (Luft-, Flüssigkeits- oder Wirbelstrombremse, Ölkatakt) ergibt eine Zeitkonstante T_a für die Verzögerung, die leicht durch Änderung am Widerstandsglied in einem weiten Bereich eingestellt werden kann. In Bezug auf die Übergangsfunktion des Reglers wirkt die Rückführung offenkundig im ersten Augenblick wie eine starre.

Die nachgebende Rückführung bringt das Verhalten eines P - I - Reglers hervor; der proportionale Anteil hängt im Idealfall nur vom Einflußgrad der Rückführung ab. Die Nachstellzeit ist gleich der Zeitkonstanten der Rückführung.

Die verzögerte Rückführung

Die verzögerte Rückführung ist das Gegenstück zur nachgebenden Rückführung und entsteht aus jener durch Vertauschen des Bremswiderstandes und der Feder. Ihre Übergangsfunktion ist komplementär zu derjenigen der nachgebenden Rückführung. Die verzögerte Rückführung überträgt schnelle Änderungen der Eingangsgröße stark geschwächt, sehr langsame mit dem vollen Betrag. Abb. 41 c

Im Grenzfall bringt die verzögerte Rückführung einen reinen P - D - Regler hervor. Seine Verstärkung hängt nur von dem Einflußgrad der Rückführung ab; die Vorhaltezeit ist gleich der Zeitkonstanten T_b der Rückführung.

Nachgebende und verzögerte Rückführung

Die gleichzeitige Anwendung der beiden zuletzt genannten Verfahren erfüllt, wie zu erwarten ist, den bisher offenen Wunsch nach dem P - I - D - Regler. Die beiden Rückführglieder dürfen nicht nebeneinander geschaltet werden, da sonst eine starre Rückführung resultiert. Sie müssen hintereinander geschaltet sein. Abb. 41 d

Wenn das Vorwärtsglied hinreichend hohe Verstärkung aufweist, realisiert die gleichzeitige Anwendung der nachgebenden und verzögerten Rückführung den P - I - D - Regler. Seine Eigenschaften werden im Idealfall allein von den Rückführgliedern bestimmt.

Bemerkung

In den beschriebenen Fällen von starrer, nachgebender und verzögerter Rückführung überbrückte die Rückführung den ganzen Weg vom Meßglied zum Stellglied. Es sind nun noch zahlreiche Varianten möglich, wenn man das Rückwärtsglied nur einen Teil der Vorwärtsglieder überbrücken läßt, die im Zuge eines gewöhnlichen Reglers hintereinander liegen. Man kann damit a) Glieder mit starker Eigenschwingungsneigung direkt stabilisieren, b) die Kennlinie des Reglers verändern und einer gegebenen Regelstrecke optimal anpassen.

Die Rückführung als Komplement zur Strecke

Überbrückt eine Rückführung den ganzen Regler, wie in Abb. 41, so kann man sie mathematisch betrachten a) als zum Regler gehörig, b) als einen der Strecke parallel geschalteten Teil des Kreises (also keine Gegenkopplung!). Bei dieser Betrachtungsweise darf man die Übergangsfunktion der Strecke und der Rückführung addieren. Das Ergebnis ist die Übergangsfunktion einer neuen "Strecke", die nun mit dem "ursprünglichen" Regler stabil arbeiten kann. Das Ergebnis beider Betrachtungsweisen stimmt natürlich überein.

Nicht - lineare Regelkreisglieder

Bei zahlreichen physikalischen und physikochemischen Prozessen besteht ein nicht linearer Zusammenhang zwischen der abhängigen (Regelgröße) und den unabhängigen Variablen (Stellstrom bzw. Stellgröße). Als Ursache dafür kommen nicht lineare Strecken, sowie Lose und Haftreibung in Frage.

Die nicht lineare Beziehung zwischen Regel- und Stellgröße ist für die Regelaufgaben hinderlich. Hat man z. B. für einen bestimmten Sollwert oder Arbeitspunkt einen optimalen Regler gefunden, so kann man mit demselben Regler einen anderen Arbeitspunkt der Strecke nicht mit der gleichen Genauigkeit einhalten.

Auch eine geschlossene mathematische Betrachtung solcher Regelkreise ist unmöglich. Jede Berechnung gilt nur für einen Punkt oder eine so kurze Strecke, daß für sie praktisch Proportionali-

tät angenommen werden kann.

Nicht lineare Strecken

Zur Beurteilung des Verhaltens einer Regelstrecke im stationären

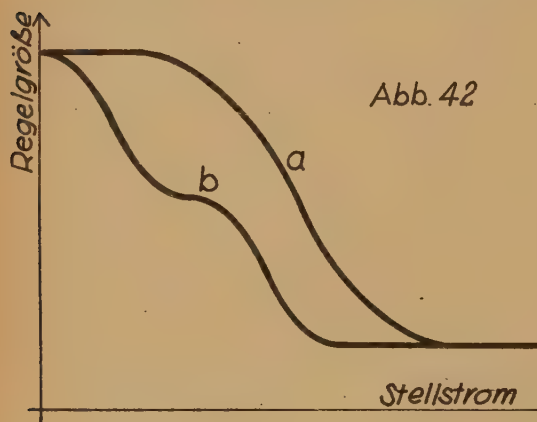


Abb. 42

Zustand betrachtet man zunächst die Abhängigkeit der Regelgröße vom Stellstrom, also der vom Stellglied abhängigen Größe (Volumen des verschütteten Reagens bei der pH - Regelung). Der Einfluß des Stellgliedes auf den Regelkreis ist dadurch ausgeschaltet.

Abb. 42 zeigt a) die EMK einer Elektrodenkette (Ordinate) in Abhängig-

keit von der zur Regelflüssigkeit zugegebenen Reagenslösung (Abszisse).

Abb. 42 gibt b) das Verhalten der gleichen Strecke nach Zusatz eines Puffers an. Die erhaltene Kennlinie wird als "Kennlinie des Vorgangs" bezeichnet.

Auch das Stellglied hat häufig eine gekrümmte Kennlinie. Abb. 43

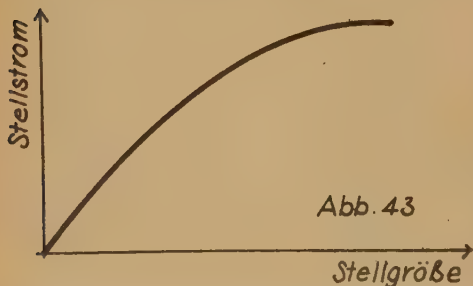


Abb. 43

zeigt z. B. den Stellstrom (zur Regelflüssigkeit zugegebene Reagenslösung) als Funktion der Stellgröße (Ventilstellung) für ein einfaches Ventil. Die so gebildete Kurve nennt man "Kennlinie des Stellgliedes". Durch Kombination der Kennlinien des Vorganges und des Stellgliedes

erhält man die Kennlinie der Strecke, also die Abhängigkeit der Regelgröße von der Stellgröße im stationären Zustand.

Durch geeignete Auslegung des Stellgliedes kann man die Kennlinie

der Strecke beeinflussen. So wird z. B. eine im Hauptarbeitsbereich stark gekrümmte Kennlinie des Vorgangs durch eine entgegengesetzt gekrümmte Kennlinie des Stellgliedes linearisiert.

Eine Regelstrecke wird durch ihren Ausgleichwert q (s. S. 26) charakterisiert. Für eine lineare Kennlinie ist q unabhängig vom Arbeitspunkt. Solange in einer bestimmten Anlage der Regler nur innerhalb eines kleinen Bereichs arbeiten soll, ist der Verlauf der Streckenkennlinie ziemlich belanglos. Es genügt für eben diesen Bereich, d. h. praktisch für den Sollwert den Ausgleichswert der Strecke $q = 1/V_S$ zu messen; damit hat man einen der Kennwerte, aus denen die zweckmäßige Bemessung des Reglers gefunden werden kann.

Soll die Anlage auf einen anderen Arbeitspunkt umgestellt werden, dann kann bei einer stark gekrümmten Kennlinie q bzw. V_S so stark von dem früheren Wert abweichen, daß auch der Regler neu eingestellt werden muß, um wieder optimal zu arbeiten.

Lose und Haftreibung

Unter Lose versteht man den toten Gang. Er tritt immer auf an me-

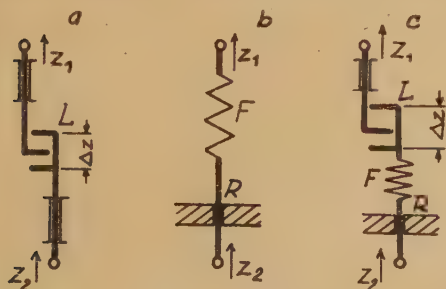


Abb. 44 a-c

chanischen Gelenken und Getrieben. Abb. 44 a stellt schematisch zwei in z - Richtung verschiebbare Apparateile dar. Wird der eine Teil festgehalten, so kann der andere um Δz bewegt werden. Δz ist der Losebereich. Bild 45 a zeigt die Bewegung des angetriebenen Teils (z_2) in Abhängigkeit von

der Zeit, wenn der treibende Teil (z_1) eine hin- und hergehende Bewegung ausführt; Massenkräfte sind vernachlässigt. Je größer die Ausschläge im Vergleich zum Losebereich sind, desto weniger wirkt er sich relativ aus. Die Lose ist mit der "Totzeit" vergleichbar und im Regler schädlich.

Eine ähnliche Wirkung hat die Haftreibung R , wie man aus Bild 44 b

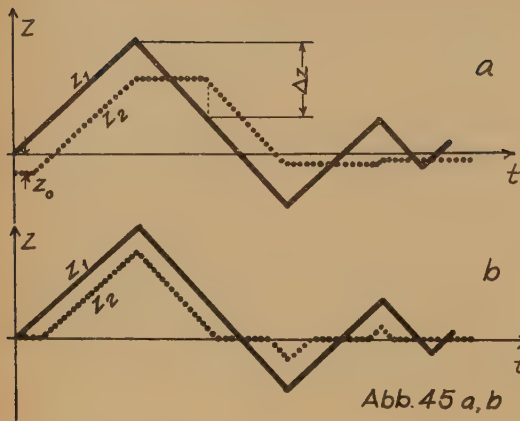


Abb. 45 a, b

ersehen kann. Es ist eine endliche Federspannung um den Betrag Δz_1 erforderlich, um eine Bewegung von z_2 hervorzubringen. Die Verbindung von Feder mit Lose ergibt Bild 44 c und Abbildung 45 b.

Die allgemeine Folge von Lose und Haftreibung ist das Auftreten eines Ansprezbereiches zu beiden Seiten des Sollwertes, innerhalb

dessen eine Regelabweichung nicht oder nicht immer ausgewertet wird. Darüber hinaus können sie Anlaß zur Instabilität sein.

Lose innerhalb einer mechanischen Rückführung wirkt im Sinne eines verzögernden Gliedes und kann (!) gelegentlich eine Verbesserung bringen.

Unstetige Regler

Begriff des unstetigen Reglers

Man bezeichnet alle Regler als "unstetig" bei denen keine ständige Verbindung zur Strecke besteht.

Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Die Regelgröße wird ständig gemessen, aber das Stellglied besitzt nur 2 Grundstellungen (z. B. Ein - Aus oder Auf - Zu). Bei einer bestimmten Abweichung der Regelgröße vom Sollwert nach oben oder unten bewegt sich das Stellglied von der einen in die andere Lage. Eine Proportionalität zwischen der Größe der Regelabweichung und dem Stellgliedausschlag besteht nicht. Der zeitliche Abstand der Umschaltungen hängt von der Schnelligkeit der Abweichung der Regelgröße von ihrem Sollwert und damit von zahlreichen Faktoren ab, ist aber jedenfalls nicht vorgegeben.

2. Die Regelgröße wird nur in bestimmten festen Zeitabständen gemessen, der Korrekturbefehl folglich auch nicht ständig an den Regler weitergegeben.

Auch hier kann wiederum eine Regelabweichung die eine oder andere Grenzstellung des Stellgliedes bewirken. Häufiger wird jedoch eine stufenweise Bewertung der Regelabweichung vorgenommen. Hierbei sind einer kleinen, mittleren und großen Regelabweichung entsprechende Verstellungen des Stellgliedes zugeordnet.

Ist die Abstufung der einzelnen Stellgliedstellungen hinreichend fein und das Abtastintervall klein gegen die Hauptkonstante der Regelstrecke, dann unterscheidet sich solch ein Regler nicht mehr wesentlich von einem stetig wirkenden.

Grundsätzlich ist also die Arbeitsweise eines unstetigen Reglers dadurch gekennzeichnet, daß im Verlauf eines Regelungsvorganges einzelne Größen sprunghafte Veränderungen erleiden.

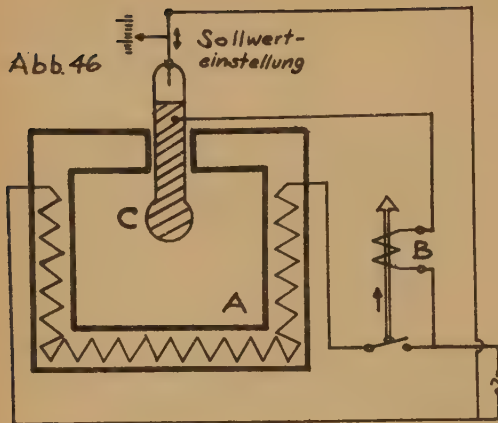
Vorteile der unstetigen Regler

Beim unstetigen Regler kann der Meßwert leichter verstärkt werden, als beim stetigen, da auf einen proportionalen Zusammenhang zwischen Meß- und Stellgröße verzichtet wird.

Ferner ist die Verwendung des unstetigen Reglers mit (periodischer) mechanischer Abtastung des Zeigers überall dort am Platz, wo ein empfindliches Drehspulmeßgerät die Stabilität des Regelkreises durch starke Eigenschwingungen gefährdet.

Der Ein- Aus- (Auf- Zu-) Regler

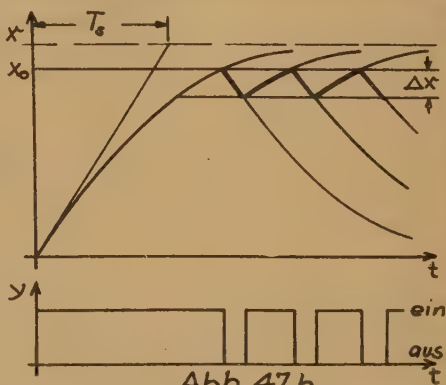
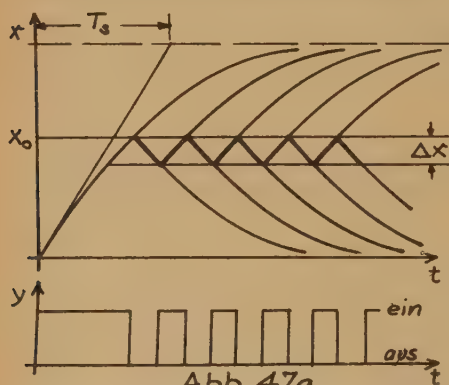
In Abb. 46 wird eine Flüssigkeit A elektrisch beheizt. Das Thermometer C zeigt die Temperatur an. Erreicht das Quecksilber des Thermometers den vorgegebenen Sollwert, so schließt es einen Stromkreis B und öffnet damit den Heizstromkreis. Die Temperatur der Flüssigkeit sinkt nun wieder, bis der Kontakt am Sollwert unterbrochen wird.



Das Quecksilberkontaktthermometer pflegt bei Abkühlung bei einer niedrigen Temperatur zu öffnen, als es bei Erwärmung schließt, ein Effekt, der auch Quecksilberschaltrohren eigentümlich ist. Erst bei einer bestimmten Abweichung Δx vom Sollwert wird der Heizstrom wieder eingeschaltet. Diese Schwankung Δx der Regelgröße ist die "Ansprechempfindlichkeit".

lichkeit".

Abb. 47 a zeigt das Verhalten des "Stellgliedes" hier des Schützes



und den Temperaturanstieg beim Beheizen der Flüssigkeit, sowie seinen Abfall, sobald der Heizstrom unterbrochen wird.

Nun legt man, wie in Bild 47 b gezeichnet, den Sollwert höher, nahe an die stationäre Temperatur, die nach hinreichend langer Zeit in Stellung "Ein" erreicht wird. Man erkennt, daß bei festgelegter Zeitkonstante die Frequenz der Pendelung stark von der gegebenen Ansprechempfindlichkeit, aber auch von der Lage des Sollwertes abhängt.

Grundsätzlich ist die Frequenz der (unvermeidlichen) Regelschwin-

gung für einen bestimmten Sollwert der Größe Δx umgekehrt proportional; das bedeutet um so höhere Beanspruchung der Schaltorgane, je geringere Schwankungen zugelassen werden.

Der Zwei - Punkt - Regler

Der Ein - Aus - Regler zeigt heftige und bei großer Regelgenauigkeit (kleines x) auch häufige Umschaltungen zwischen Null und der vollen Leistungszufuhr. Die damit verbundene starke mechanische Beanspruchung der bewegten Teile des Reglers trachtet man zu vermindern.

Es werden dazu statt des einen Kraftschalters beim Ein - Aus - Regler zwei eingeführt, die in gleichen Abständen auf beiden Seiten des Sollwertes liegen. Unter- oder überschreitet die Regelgröße den Sollwert um einen bestimmten Betrag, so tritt der Richtung der Abweichung entsprechend einer der Schalter in Betrieb und leitet eine Korrektur im richtigen Sinne ein.

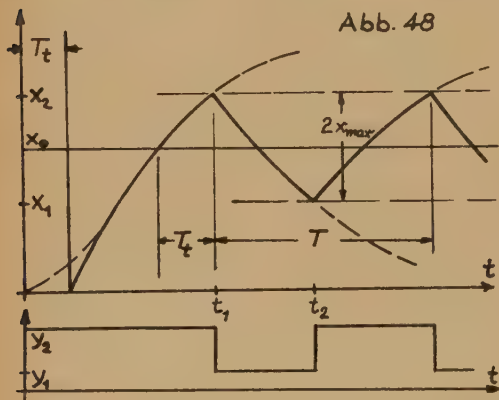
Je näher die beiden Energieniveaus an das dem Sollwert entsprechende herangerückt werden, desto häufiger schaltet der Regler, desto größer ist aber auch die Gefahr, daß eine Störgröße aus dem Regelbereich herausführt.

Die Anordnung nach Bild 46 kann man zu einem Zwei - Punkt - Regler umbauen, indem man dem Schütz Umschaltkontakte gibt, so daß es eine dreiphasige Offenwicklung von der Dreieckschaltung auf Sternschaltung umlegt.

Die Möglichkeit, die Anlage zwischen zwei endlichen Niveaus der Energiezufuhr pendeln zu lassen, hat dazu geführt, den Regler als Zwei - Punkt - Regler zu bezeichnen. Der Auf - Zu - Regler ist in diesem Sinne ein Spezialfall.

Unter dem Einfluß der Störgrößen ändert sich bei Zwei - Punkt - Regler in erster Linie das Verhältnis der Zeitintervalle, in denen das Stellglied in der einen oder anderen Stellung steht. Daneben ändert sich die Frequenz der Regelschwingungen und ihre Kurvenform, so daß der Mittelwert nicht ganz konstant bleibt.

Vergleich mit dem stetigen Regler: Beim stetigen Regler führt erst eine Erhöhung der Verstärkung oder Stellgeschwindigkeit über einen kritischen Wert hinaus zur Instabilität, d. h. zu wilden Schwingungen, welche den Betrieb der Anlage lahmlegen. Der Zweipunktregler jedoch pendelt grundsätzlich, sei es durch Ansprechgrenzen im Meßwertumformer oder Verzögerung höherer Ordnung in der Strecke;



diese Dauerschwingung des Regelkreises ist aber leicht vorauszuberechnen und zum mindesten bezüglich der Amplitude verhältnismäßig einfach zu beherrschen. Wie nach Bild 48 einleuchtet, ist bei gegebenem Verhältnis T_t/T_S die Amplitude der Regelschwingung proportional $(x_2 - x_0) = 1/2 (x_2 - x_1)$, also proportional $(y_2 - y_1)$. Ist diese Differenz groß,

so entspricht das formal einer großen Verstärkung eines stetig wirkenden P - Reglers und umgekehrt. Man hat es also in der Hand, durch geeignete Wahl des oberen und unteren Festwertes, den die Stellgröße in den beiden Betriebspunkten des Reglers aufweist, die Amplitude der Regelschwingung hinreichend klein zu halten. Erwähnt wurde bereits die selbstverständliche Einschränkung, daß der Bereich $y_2 - y_1$ mindestens so groß sein muß, daß er eine Bekämpfung der größten zu erwartenden Störgröße gestattet.

Differenzierende Meßgeräte als Zusätze zum Zweipunktregler sind verwendbar und können eine Verkleinerung des Verhältnisses T_t/T_S bewirken (T_S = Zeitkonstante der Strecke!).

Der Schrittregler

Beim Zweipunkt - Regler ist das Verhältnis der Zeiten, in denen das Stellglied in der einen oder anderen Grenzstellung ist, von der Sollwerteinstellung und der Störgröße abhängig. Damit sich der Mittelwert des Stellstromes den jeweiligen Erfordernissen anpassen kann, muß der Regler pendeln.

Will man das Pendeln vermeiden und die Regelabweichung nur zu bestimmten willkürlich gewählten Zeiten abtasten, so muß das Stellglied in jede Zwischenlage gebracht werden können, die der gemessenen Regelabweichung entspricht.

Bild 49 zeigt schematisiert die Anordnung des bekannten "Fallbügel - Reglers". Z ist das vordere Zeigerende eines Meßwerks mit

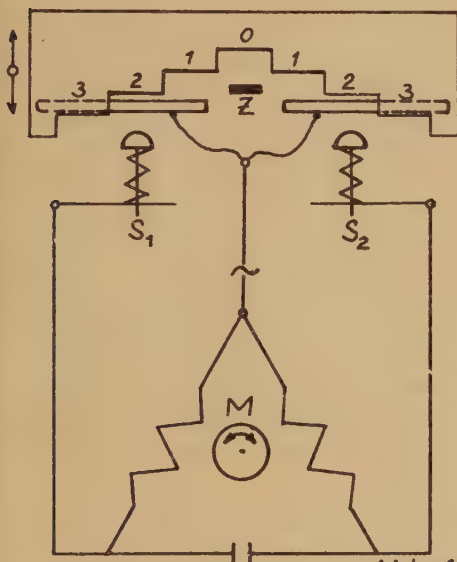
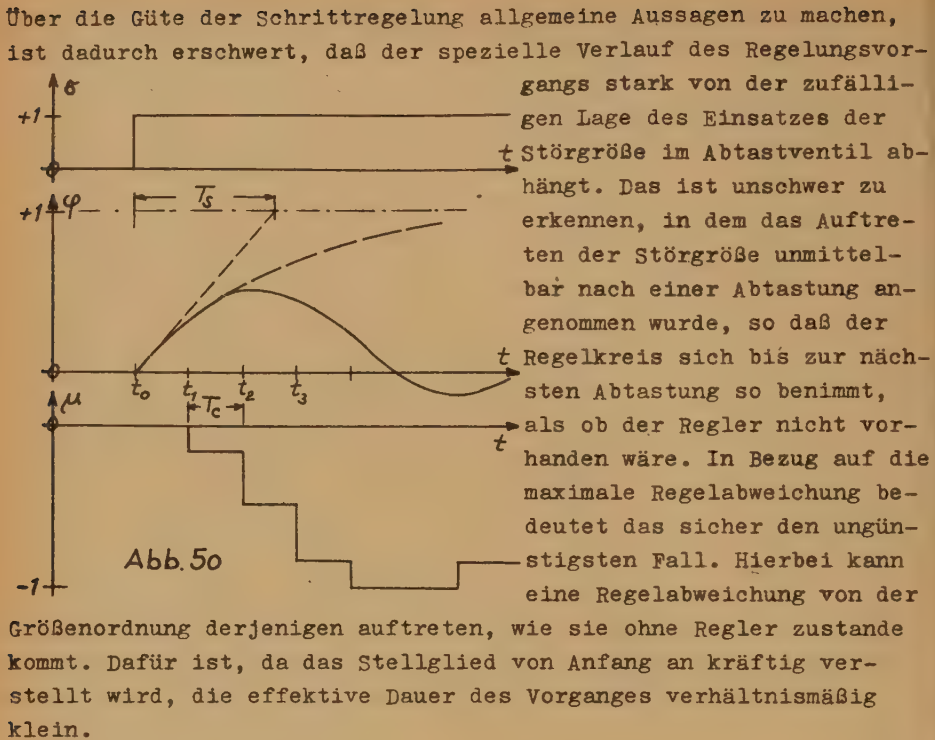


Abb. 49

senkrechter Achse. Der Zeiger ist in senkrechter Richtung nachgiebig und kann bei einer Auslenkung aus der dem Sollwert entsprechenden Lage (0) durch das periodisch bewegte Stufenblech B nach unten gedrückt werden. Je nach dem Vorzeichen der Auslenkung wird dabei über den Zeiger einer der beiden Schaltkontakte S_1 und S_2 betätigt, welche mit den Wicklungen eines Umsteuermotors M verbunden sind. Die Schaltvorrichtung ist nur angedeutet; meist werden Quecksilberschaltröhren verwendet, mit denen praktisch

alle Stellmotoren geschaltet werden können. Die Dauer einer Auf- und Ab-Bewegung des Stufenbleches, der Abtastzyklus T_c , möge beispielsweise 15 Sekunden betragen; davon verweilt das Stufenblech 2 Sekunden in der höchsten Lage, so daß das Meßwerk genügend Zeit zur Einstellung hat. Bleibt der Zeiger innerhalb der "Freizeit" in dem Bereich der Stufe 0 (Ansprechintervall!), so wird der Motor überhaupt nicht in Betrieb gesetzt. Steht er unter der Stufe 1 bzw. 2 oder 3, dann wird der Motor, um runde Zahlen anzugeben, 2 bzw. 4 oder 6 Sekunden eingeschaltet. In erster Näherung - nämlich wenn die Zeitkonstante des Motors hinreichend klein ist - kann angenommen werden, daß die nach jedem Abtastvorgang erreichte Änderung des Stellgliedausschlags der der jeweiligen Stufengröße proportional ist.



Tritt die Störgröße kurz vor einer Abtastung auf, so wird die maximale Abweichung kleiner, aber die Dauer des Vorganges wird vergrößert. Die maximale Regelabweichung beträgt etwa bis zur Hälfte derjenigen, die bei einer gegebenen Störgröße ohne Regler auftritt, und als Zeit zur Ausregelung ist größenordnungsmäßig das Fünffache der Zeitkonstanten der Strecke erforderlich.

Charakteristika für den Schrittregler sind:

Die Zeitkonstante T_C , d. i. die Zeit, die einen vollen Abtastzyklus umfaßt; die Stellgröße μ ; der bezogene Schaltschritt S . T_S bedeutet wieder die Zeitkonstante der Strecke, V_S und V_R die Verstärkung von Strecke und Regler.

Ein Schrittregler wirkt, obgleich er einen integral wirkenden Stellmotor hat, durch den intermittierenden Betrieb wenigstens innerhalb eines Abtastzyklus annähernd proportional. Man kann da-

her von einer Verstärkung des Reglers sprechen, die die Größe $V_R = -S \cdot 1/V_S = S_q$ hat.

Schrittregler mit Rückführung

Selbst bei günstiger Einstellung arbeitet der einfache Schrittregler verhältnismäßig träge; durch eine Rückführung kann jedoch eine beträchtliche Verbesserung erzielt werden.

Den Vorgang zeigt Abb. 51. T_c ist hier gleich T_S genommen. Zur Zeit t_0 , die unmittelbar auf eine Abtastung folgen soll, beginnt

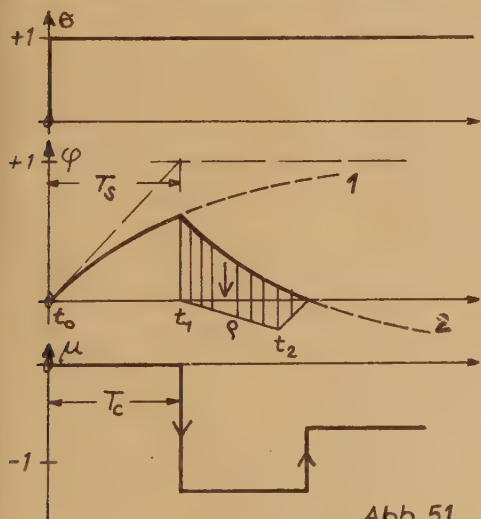


Abb. 51

die Regelabweichung gemäß der Übergangsfunktion der Strecke (Kurve 1). Zur Zeit $t_1 = t_0 + T_c$ wird die nun vorhandene Regelabweichung gemessen und daraus $\Delta\mu(t_1)$ gebildet. Im Gegensatz zu der Schrittregelung ohne Rückführung wird hier die Stufe S nicht in der Größenordnung von 0,1, sondern sogar größer als 1 gemacht (1 sei der Wert der Stellgröße, der die Regelabweichung 1 völlig korrigiert). Die Regelabweichung wird folglich sehr stark abgebaut (Kurve 2). Da

Kurve 2 weit in das negative Gebiet führt, würde damit im Regelkreis eine starke Pendelung, wenn nicht Instabilität, auftreten. Nun wird aber, nachdem die erste Verstellung $\Delta\mu(t_1)$ vollzogen ist, über eine ganz leicht verzögerte, im wesentlichen nachgebende Rückführung die Meßgröße $\Delta\varphi(t_1)$ durch eine gleich große Rückführgröße $\varphi = c_2 \Delta\mu(t_1)$ wegkompensiert (c_2 ist der Einflußgrad der nachgebenden Rückführung). Da es sich um eine nachgebende Rückführung handelt, klingt die Rückführgröße mit der Zeitkonstante der nachgebenden Rückführung T_a ab (vergl. Abb. 41). Der Schaltschritt S wurde so gewählt, daß die Regelabweichung zur Zeit $t_2 = t_1 + T_c$ gerade durch Null geht. In diesem Augenblick wirkt am Meßwertgeber $\varphi(t_2)$ mit dem negativen Vorzeichen, so daß beim

Abtasten die Rückführgröße allein gemessen und das Stellglied um den Betrag $\Delta\mu(t_2)$ zurückgenommen wird in die Stellung $\mu = -1$, die der vollständigen Ausregelung entspricht. Daraus folgt die Bedingung für T_a . Das Einlaufen der Regelabweichung in das negative Gebiet wird durch den Sprung $\Delta\mu(t_2)$ verhindert, zugleich wird die Rückführgröße von $\varphi(t_2)$ auf Null gebracht, und der Regelvorgang ist nach der Zeit $2 T_c$ (!) völlig beendet.

Die Vorstufe des Schrittreglers ist der Fallbügelregler, welcher zu beiden Seiten des Sollwertes nur einen Schaltkontakt für Vorwärts- und Rückwärtsschaltung des Stellmotors betätigt.

Vergleich mit dem stetigen Regler: Der Schrittregler ist dem stetigen Regler manchmal überlegen. Sein Vorteil ist die periodische Unterbrechnung der Verbindung zwischen Regler und Strecke, etwa am Meßwertgeber, so daß jeweils nach der Zeit T_0 der Kreis vom offenen in den geschlossenen Zustand übergeht und umgekehrt. Damit wird einer Instabilität des Kreises entgegengewirkt. Die Regelschwingung erlischt, weil in einer Rechteckwelle von der Periodendauer $2 T_0$ (Zeit der Regelschwingung) Schwingungen von der Periodendauer T_0 , $T_0/2$, $T_0/4$ usw. nicht enthalten sind.

U n t e r s u c h u n g d e r E i g e n s c h a f t e n e i n e s R e g e l k r e i s e s

Um einen Regelkreis zu untersuchen, kennt man mehrere Methoden:

1. Man bestimmt die Übergangsfunktion der Strecke und des Reglers, legt ihre Konstanten fest und errechnet daraus die Übergangsfunktion des Kreises.
2. Nach der zweiten Methode wird der Regelkreis als Ganzes (oder auch einzelne Teile davon) absichtlich durch eine periodische Eingangsgröße in Schwingungen kleiner Amplitude versetzt. Aus dem Verhalten der Ausgangsgröße kann auf die gesuchten Eigenschaften und Kennwerte des Kreises geschlossen werden.

Man kennt Frequenz n , Phase ωt und Amplitude P_e der aufgefropften oder Eingangsschwingung. Die Schwingung am Ausgang des Kreises hat

entsprechend den Eigenschaften der Strecke die Amplitude P_a und

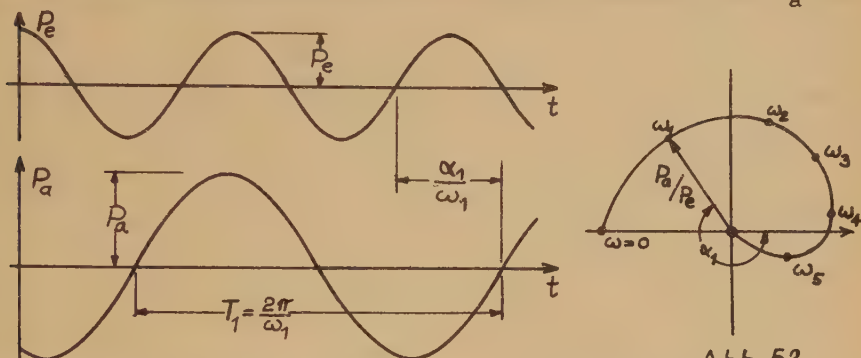


Abb. 52

gegenüber der Eingangsschwingung eine Phasenverschiebung $\omega t + \alpha$. Zur Charakterisierung der Regelstrecke muß man P_a/P_e für viele Frequenzen bestimmen. Das Ergebnis wird in Form eines Zeigerdiagramms unter dem Winkel α gegen die positive Abszisse aufgetragen, wobei α aus der Zeitdifferenz zweier gleichsinniger Nulldurchgänge von p_a und p_e (p_a und p_e sind die Amplituden an jedem beliebigen Punkt der Schwingungen) durch Multiplikation mit ω errechnet wird. Die Punkte liegen auf einer Kurve, die man bei Variation der Frequenz von Null bis ∞ erhalten würde. Sie wird die Ortskurve des aufgeschnittenen Kreises genannt. (Abb. 52)

In gleicher Weise ist es möglich, die Ortskurve einer Regelstrecke oder eines Reglers aufzunehmen.

Die Methode des Frequenzganges ist nur bei der Untersuchung von stetig wirkenden Reglern geeignet; bei unstetigen nur, soweit sie sich näherungsweise wie stetige verhalten. Schwierigkeiten bestehen auch, wenn man nicht lineare Übertragungsglieder in einem Kreis hat.

Eine wertvolle Abwandlung der Ortskurve stellt das Amplitude - Phase - Diagramm dar. Hierbei wird der dekadische Logarithmus der Amplitude und der Phasenwinkel in Abhängigkeit vom Logarithmus der Frequenz aufgetragen. Dieses Diagramm eignet sich besonders gut zur Multiplikation und Division komplexer Größen, die Ortskurvendarstellung wird hauptsächlich zur Addition und Subtraktion verwendet.

Die Anwendung der Theorie der erzwungenen Schwingungen erleichtert die Analyse und Synthese von Regelkreisen sehr, in vielen Fällen ermöglicht sie sie überhaupt erst mit tragbarem Aufwand an Zeit und Rechenhilfsmitteln. Sie ist ein besonders wertvolles Hilfsmittel bei der Untersuchung mehrläufiger (vermaschter) Regelkreise, weil eine ins Einzelne gehende mathematische Behandlung erst dann Sinn hat, wenn ungefähr brauchbare Bemessungen für die Teile der Anlage gefunden sind.

G e r ä t e z u r a u t o m a t i s c h e n p H - R e g e l u n g

PH - Regler werden heute noch nicht serienmäßig von der Industrie hergestellt. Bei den als "pH - Automat" oder ähnlich bezeichneten Instrumenten handelt es sich meist um schreibende Meßgeräte.

Allerdings gibt es heute schon eine Reihe von Firmen, die für bestimmte, meist in der Industrie vorkommende Regelstrecken, handelsübliche Regler abstimmen und optimal einstellen. Dazu gehören vor allem die Firmen Hartmann & Braun, Beckman, Siemens & Halske, Philips und Metrohm.

Einige besonders für die pH - Regelung geeignete Geräte, die aber bis heute noch nicht in Serienanfertigung erhältlich sind, wurden von Lingane, Jacobsen und Leonis sowie von Meyer beschrieben. Sie und einige der allgemein verwendbaren Regler werden nun kurz erläutert.

Der Fallbügelregler von Hartmann & Braun (14, 15)

Prinzip, vergl. Abb. 53

Die EMK der Elektrodenkette wird einem Drehspulmeßinstrument 8 zugeleitet. Unterhalb des Meßwerkzeigers 1 ist längs seiner ganzen Bahn, zwischen Nullstellung und Endausschlag, ein sogenannter Abtastbügel 3 angebracht. Er besteht aus einem Metallstreifen von der Länge der Instrumentenskala und wird durch einen kleinen Motor 4 über eine Kurvenscheibe 6 (s. S. 87, Abs. 2) periodisch gehoben und gesenkt. Oberhalb der Bahn des Zeigers und etwa 1 cm

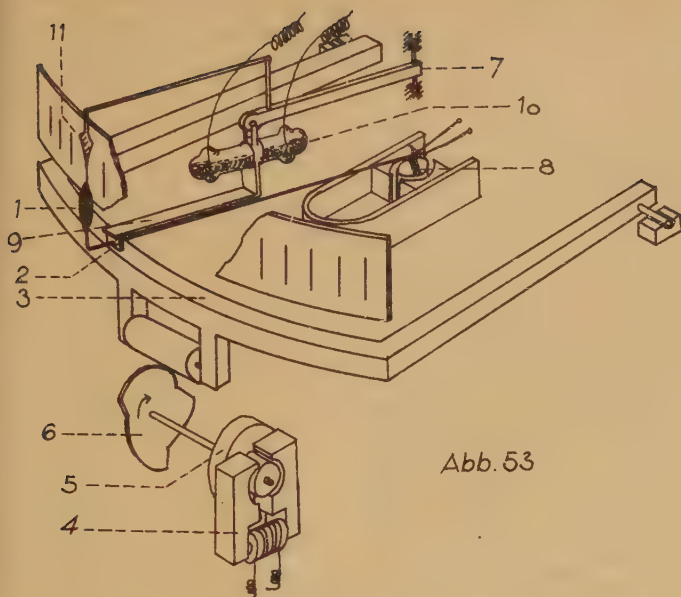


Abb. 53

über dem Ab-
tastbügel be-
findet sich
ein Gegenla-
ger 9. Es be-
steht aus einem
kurzen Metall-
streifen, der
über dem Ab-
tastbügel hin-
und herge-
schwenkt wer-
den kann und
so auf alle
Stellungen des
Zeigers ein-
stellbar ist.
Geht der Ab-
tastbügel nach

oben, so kommt er mit dem Zeiger in Berührung und hebt ihn ein wenig an. Befindet sich das Gegenlager gerade über dem Zeiger, so wird dieser gegen das Gegenlager gedrückt und schließt dabei einen Kontakt. Steht der Zeiger nicht unter dem Gegenlager, so bleibt die Kontaktgabe aus.

Ein Fallbügelregler besitzt mindestens ein, meist aber zwei oder mehrere Gegenlager. Jedes ist mit einem Einstellarm 7 verbunden, der eine Marke 11 besitzt, die auf der Skala des Instrumentes gleitet. Bei der Regelung auf einen bestimmten Sollwert werden zu beiden Seiten und in gleichen Abständen vom Sollwert Gegenlager angebracht. Unter- oder überschreitet die Regelgröße den Sollwert um den eingestellten Betrag, so sprechen die Kontakte an, ein Stromkreis schließt sich und das Stellglied wird in Tätigkeit gesetzt.

Als kontaktgebende Organe dienen beim Fallbügelregler nach Hartmann & Braun Quecksilberschaltröhren 10. Darunter versteht man Glasröhren mit eingeschmolzenen Kontaktstiften und teilweiser Quecksilberfüllung, die bei Neigung der Röhre eine leitende Ver-

bindung zwischen den Kontaktstiften herstellt. Eine solche Röhre wird also z. B. durch die vom Abtastbügel über das Zeigerdruckstück und das Gegenlager ausgeübte Kraft "gekippt".

Dauerkontakt - Momentankontakt

Der Meßwertzeiger kann sowohl einen Dauer- als auch einen Momentankontakt durch die Quecksilberschaltröhren bewirken.

Bei Dauerkontaktgabe bleibt die Röhre, bzw. eine Wippe mit aufmontierter Röhre, wenn sie einmal gekippt wurde, in dieser Stellung, bis sie von einem anderen Schaltmechanismus des Reglers, z. B. durch Schließung eines anderen Kontaktes, abgelöst und in ihre Ausgangslage zurückgebracht wird.

Von einem Momentankontakt spricht man, wenn das Schaltrohr nur so lange gekippt ist, wie der Abtastbügel über den Zeiger auf das Gegenlager drückt. Hierbei kann die Kontaktgabe längere oder kürzere Zeitspannen umfassen, je nach der Größenordnung der Sollwertabweichung. Bei der technischen Ausführung hat man die Möglichkeit

1. den Fallbügel oder
2. das Gegenlager abzustufen. Die Kontaktgabe erfolgt um so länger, je dicker der Abtastbügel bzw. das Gegenlager sind.
3. kann eine Ausschlagsabhängigkeit des Fallbügelreglers erzielt werden, durch das Anbringen von zusätzlichen Gegenlagern neben den beiden primären auf jeder Seite des Sollwertes. Sie werden so geschaltet, daß sie auf größere Abweichungen vom Sollwert ansprechen und dann eine stärkere Stellgliedverstellung bewirken bzw. ein zusätzliches Regelventil bedienen.

Von der 2. und 3. Möglichkeit wird hauptsächlich bei den Hartmann & Braun - Reglern Gebrauch gemacht. Bei dem Grob - Fein - Regler

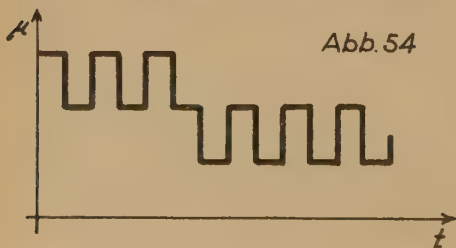


Abb. 54

z. B. erhält der Stellmotor einen Hilfsumschalter. Nähert sich der Meßzeiger dem Sollwert, so hebt er eine Wippe, die den regelnden Stromkreis unterbricht und gleichzeitig einen anderen Stromkreis zur feineren Regulie-

rung einschaltet. Ist der Sollwert erreicht, so werden durch eine andere Wippe beide Stromkreise abgeschaltet. Die Bewegung des Stellgliedes zeigt Abb. 54.

Ein anderes Gerät mit ausschlagsabhängiger Steuerung besitzt für weit vom Sollwert entfernte Meßwerte Einklinkwippen, in der Nähe des Sollwertes jedoch Wippen mit abgestufter Dicke. Die Abb. 55 zeigt verschiedene Formen von Wippen. Die Ausführung nach Abb. 55 b ist besonders für Sollwertnähe geeignet. Zwei Wippen sind hier miteinander gekoppelt. Kommt der Zeiger von der freien Skala unter die linke Wippe, so wird ein Stromkreis erregt. Wandert der Zeiger weiter bis zum Sollwert, so wird mit Hilfe der rechten Wippe der Stromkreis der linken unterbrochen.

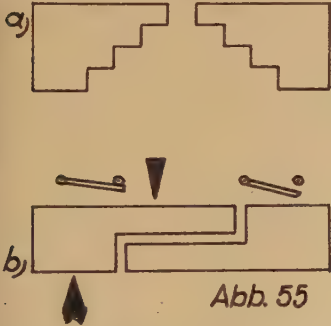


Abb. 55

Ausführung des Stellgliedes

Der beschriebene Fallbügelregler von Hartmann & Braun kann als Stellglied ein Schütz, ein Magnetventil, ein Motorventil oder eine motorgetriebene Drosselkappe besitzen. Von der Beschaffenheit des Stellgliedes hängt ja letzten Endes die Art der Reagensausschüttung durch den Regler ab.

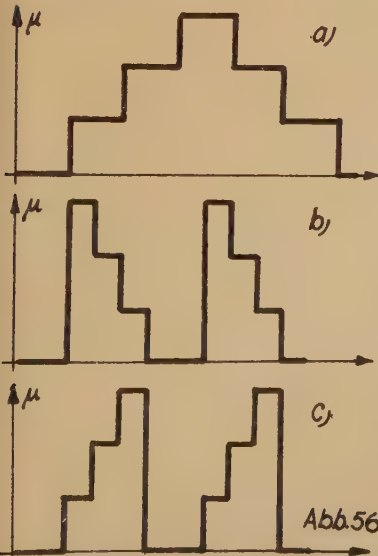


Abb. 56

Ein Fallbügelregler muß nicht unbedingt ein Auf- Zu- Regler sein. Es werden z. B. Regler mit Schrittsteuerung bei motorbetriebenen Bürettenventil hergestellt. Dazu ist in die Zuleitung zur Umschaltröhre, die die Laufrichtung des Motors bestimmt, ein Impulskontakt geschaltet, der bei jedem Hub des Fallbügels nur kurzfristig geschlossen wird. Der Stellmotor des Ventils schließt und öffnet

nun nicht in einem Zuge, sondern der Motor erhält nur kurze Verstellimpulse, so daß das Öffnen und Schließen des Ventils schrittweise vor sich geht, siehe Abb. 56 a. Diese Schaltung kann auch so abgeändert werden, daß sich das Stellglied ruckartig öffnet und schrittweise schließt oder umgekehrt, siehe Abb. 56 b und c.

Programmregler

Der Fallbügelregler wird auch als Programmregler hergestellt. Ein Motor dreht dazu eine Scheibe, deren Umfang im Sinne des Programms ausgeschnitten ist. Ein Fühlhebel tastet die jeweilige Stellung der Scheibe ab und überträgt sie auf den Sollwerteinsteller. (Abb. 53, Nr. 4, 5, 6)

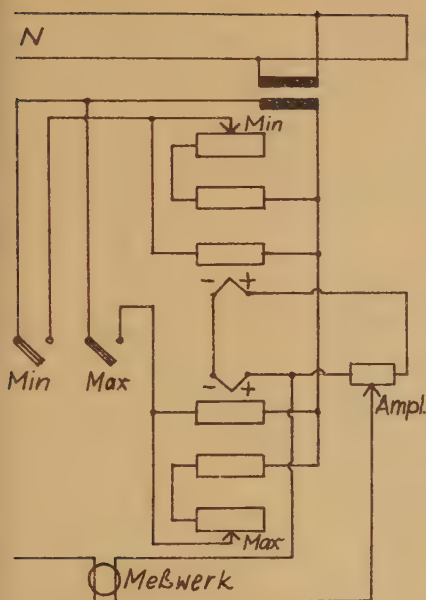
Fallbügelregler bei Strecken mit Totzeit

Soll eine Strecke mit Totzeit geregelt werden, so genügt die einfache Auf - Zu - Regelung nicht mehr. Wird nämlich durch den Bürettenhahn eine Änderung im Zufluß des Reagens zur Regelflüssigkeit veranlaßt, so wirkt sich diese erst nach einiger Zeit in einer pH - Änderung am Meßgerät aus; es würden Pendelungen im Regelkreis entstehen. Um das zu verhüten, muß dem Regler vorzeitig ein Erreichen des Sollwertes vorgetäuscht werden.

Die Firma Hartmann & Braun benützt dazu die thermische Zeigerrückführung.

Verzögerte thermische Rückführung

Der Regler besitzt außer den beiden gewöhnlichen Schaltröhren für Sollwert - Über- oder Unterschreitung noch je eine zusätzliche ("Min" und "Max"). Bei einer Abweichung vom Sollwert wird eine dieser Rückführ - Schaltröhren gleichzeitig mit der Schaltröhre für den Bürettenantrieb in Betrieb gesetzt, und es wird gleichzeitig mit dem Verstellimpuls an den Bürettenhahn ein gleicher Impuls an die Rückführung gegeben (siehe Schaltung 57 a). Dieser Impuls beheizt, je nachdem ob eine Sollwertunter- oder Überschreitung vorliegt, den Rückführwärmespeicher "Min" oder "Max". Als Folge davon führt die Thermospannung eines an den Wärmespeicher angebauten Thermoelements den Zeiger des Drehspul-Meßwerkes im



Regler mit Hilfe einer Rückführung in Richtung auf den Sollwert zurück. Da der Wärmespeicher erst aufgeheizt werden muß, ist die Rückführung verzögert.

Durch die Einstellung der Heizung der Wärmespeicher an den Potentiometern "Min" und "Max" kann in die Aufheizungs- und Abkühlungsverhältnisse jedes Wärmespeichers und somit in das Zeitverhalten der Rückführung eingegriffen werden. Im allgemeinen genügt es jedoch, nur die Stärke der Rückführungswirkung an dem Knopf "Ampl" einzustellen.

Nachgebende Rückführung

Abb. 57

Wird der Rückführbefehl nicht vom Schaltwerk, wie bei der verzögerten thermischen Rückführung, sondern vom Stellmotor, sei es unmittelbar oder auch nur mittelbar, abgegeben, so darf der Rückführeinfluß nicht starr von der Stellung des Stellmotors abhängen, wenn die Rückführung nicht zu blei-

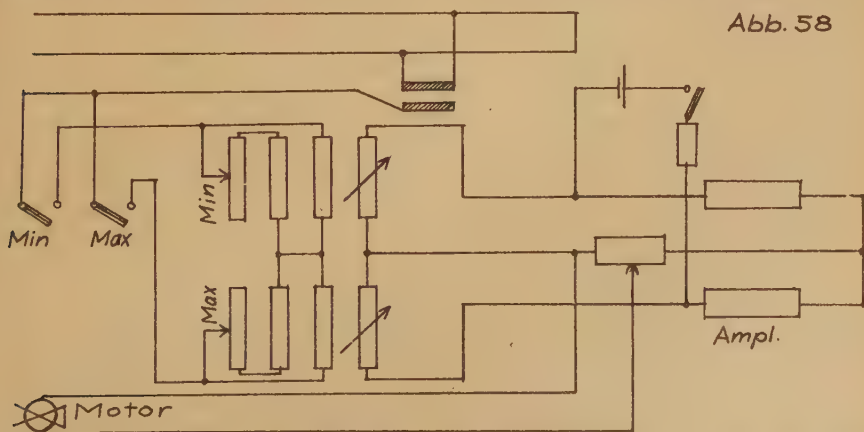


Abb. 58

benden Abweichungen führen soll. Der Rückführeinfluß muß vielmehr von selbst nach einer gewissen Zeit verschwinden, er muß nachge-

bend sein. Wie das schalttechnisch zu bewältigen ist, zeigt Abbildung 58.

Elektroanalytisches Vielzweckgerät von Lingane (16)

James Lingane beschrieb 1949 ein Vielzweckgerät, das auch für die pH - Regelung geeignet ist.

Prinzip

Ein empfindliches pH - Meßgerät besitzt längs seiner Anzeigeskala auf verschiedene pH - Werte einstellbare Kontaktpunkte. Berührt der Meßwertzeiger einen solchen Punkt, so öffnet oder schließt sich (je nach Schaltung) ein Stromkreis über eine Quecksilberschaltrohre. Die entstehende EMK wird benützt, um über einen Motor die Stellung des Bürettenhahns zu verändern.

Ausführung

Der wichtigste Teil des Reglers ist ein empfindliches pH - Meßgerät der Firma Brown, in Form eines anzeigenden Potentiometers. Damit es als Regler verwendet werden kann, muß es längs des Laufbereiches seiner Zeigers Kontakte besitzen, die auf verschiedene vorgewählte Werte einstellbar sind. Der niedrigste Ansprechbereich des Instrumentes liegt bei 0 bis 10 mV. Seine große kreisförmige Anzeigeskala (84 cm Umfang) ist in 500 Teilstriche unterteilt. Der Unempfindlichkeitsbereich des Gerätes liegt bei weniger als 1 Skalenteil, was einer Genauigkeit von 0,2 % entspricht. Um bei plötzlicher Störung die ganze Skala zu durchlaufen, braucht der Zeiger nur 12 Sekunden.

Normalerweise ist das Instrument durch einen kapazitiven Widerstand zwischen den 2 Meßwerteingangsdrähten ergänzt (um Störströme zu unterdrücken). Wird jedoch ein großer Widerstand (pH - Meßzelle und Elektroden) in den Eingangskreis gebracht, so wächst die Zeitkonstante derartig, daß das Instrument nur mehr träge anspricht. Darum wurde der kapazitive Widerstand weggelassen und damit bis zu 100 000 Ω über dem Meßwerteingang eine schnelle Ansprechung erzielt. Gewöhnlich ist das Instrument selbst geerdet und wird nur

mit geerdetem 100 Volt Wechselstrom beschickt. Bei der pH - Regelung wurde es jedoch meist notwendig, noch zusätzlich die negative Seite des Eingangskreises zu erden, um stabile Messungen zu erhalten.

Der Meßbereich des Meß - Regelgerätes kann auf eine Fülle von Werten zwischen 10 mV und 100 Volt eingestellt werden. Das geschieht

mit Hilfe des Potentialteilers, der sich aus den Präzisionswiderständen R_1 , R_2 und R_3 zusammensetzt. Das Instrument arbeitet im Grunde genommen wie ein Voltmeter mit sehr hohem Widerstand.

Der Widerstand R_1 umfaßt 10 Stufen von je 1000 Ohm, R_2 neun Stufen zu 10 000 Ohm und R_3 10 Stufen zu

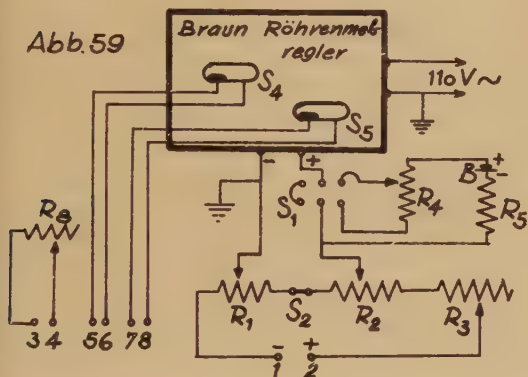
100 000 Ohm. Jede Stufe ist auf 0,1 % genau einstellbar (General Radio Co. Type 510).

Der Gesamtwiderstand von R_1 und R_2 (100 000 Ohm) ist ständig mit dem Reglereingangskreis verbunden. Durch Änderung von R_3 kann der Gesamteingangswiderstand von 0,1 bis 1,1 Megohm eingestellt werden. Dieser Widerstand ist groß genug, um eine ins Gewicht fallende Polarisation für die meisten verwendeten Elektrodenketten auszuschließen. Bei Messungen mit Elektroden von sehr hohem Widerstand, wie z. B. Glaselektroden, wird ein Vakuumröhrenverstärker zwischen die Meßzelle und das Meß - Regel - Gerät geschaltet.

Öffnet man Schalter S_2 , setzt R_1 auf 10 (weit links in Abb. 59), R_2 auf 9 (weit rechts) und R_3 auf Null, so kann das Instrument als Voltmeter zwischen Null und 10 mV benutzt werden.

Das Potentiometer R_4 (10 Teile zu 10 000 Ohm, Beckman Helipot) dient dazu, dem Nullpunkt des Meß - Regel - Gerätes jede gewünschte Stellung auf der Skala zu geben. Damit wird das Instrument

Abb. 59



fähig, auch Eingangsimpulse zu verwerten, die während des Experiments ihr Vorzeichen wechseln. Das Potentiometer R_4 erhält seine Spannung von einem 1,5 Volt Trockenelement B, das mit einem nicht veränderlichen Widerstand R_5 von 140 000 Ohm in Reihe geschaltet ist. Auf diese Weise hat es einen Stellbereich von 1 - 10 mV. Durch Umpolung der Batterie kann das Potentiometer R_4 auch dazu verwendet werden, die Impulse aus der Meßzelle zu kompensieren.

Damit das Gerät als Regler arbeiten kann, sind zwei Quecksilberschaltröhren, S_4 und S_5 , mit dem Meß - Regler verbunden. Bei bestimmten Stellungen des Zeigers werden sie geschaltet. Durch seitliche Verschiebung dieser beiden Schalter kann der genau definierbare Unempfindlichkeitsgrad des Reglers von 1 oder 2 Skalenteilstriichen (0,2 bis 0,4 %) ab auf jeden größeren Wert eingestellt werden. Der Schalterring kann bis zu 4 Quecksilberröhren aufnehmen und da diese entweder getrennt voneinander, oder in verschiedenen Kombinationen verwendet werden können, ist der Regler fähig, eine Anzahl verschiedener Schaltaufgaben durchzuführen.

Anwendungsbeispiel

Lingane selbst hob als Anwendungsgebiete für sein Gerät hervor: die Elektrolyse bei konstantem Potential oder bei konstanter Stromstärke, sowie die automatische potentiometrische Titration und noch einiges mehr. Von einer "pH - Regelung" im eigentlichen Sinn wird, wenigstens in der mir verfügbaren Unterlage, nicht wörtlich gesprochen, doch ist durch geringfügige Änderung der Titrationsanordnung leicht eine pH - Regelanlage herstellbar.

Soll eine Titration mit einer einzigen Ausschüttung von Reagens bis zum Titrationsendpunkt vorgenommen werden, so ist eine Quecksilberschaltröhre als Ein - Aus - Schalter in Reihe geschaltete mit einem Motor, der die Spritzbürette antreibt. Die Quecksilberröhre ist auf den bekannten Äquivalenzpunkt oder etwas davor eingestellt. Wird durch den Meßwerkzeiger die Röhre geschaltet, so stoppt sie die Reagensausschüttung.

Um eine größere Geschwindigkeit der automatischen Titration zu erreichen, ohne dabei an Genauigkeit einzubüßen, kann der Titra-

tionsgang in mehrere Schaltabschnitte eingeteilt werden. Bis in die Nähe des Endpunktes wird schnell titriert, dann langsamer und in unmittelbarer Nachbarschaft vom Endpunkt nur mehr tropfenweise.

Das Bürettenventil wird dazu von einem kleinen Gleichstrommotor verstellt, dessen Geschwindigkeit verändert werden kann. Dazu dient der Schiebewiderstand R_8 (Radiopotentiometer, ganz links auf der Schaltskizze). Aufgabe ist, die Titration an einem bestimmten Punkt a zu verlangsamen und im Äquivalenzpunkt zu stoppen

Der Gleichstrommotor ist zwischen die Kontakte 3 und 6 geschaltet; die Kontakte 4 und 5 sind miteinander leitend verbunden, so daß R_8 im Stromkreis hinter dem Motor liegt. Es besteht also nun ein Stromkreis über den Schalter $S_4 - 6 - \text{Motor} - 3 - R_8 - 4 - 5 - S_4$. Der Schalter S_4 wird so eingestellt, daß er sich im oder kurz vor dem Äquivalenzpunkt öffnet.

Der Schalter S_5 ist auf den Punkt a eingestellt. Nun wird ein zweiter Stromkreis gebildet über $S_5 - 8 - 3 - R_8 - 4 - 7 - S_5$. Wird S_5 geschlossen, so wirkt er im Sinne einer Verkürzung des Widerstandes R_8 und erlaubt damit sehr große Reagensausschüttung pro Zeiteinheit. Nähert sich der Meßwertzeiger dem Äquivalenzpunkt und erreicht dabei den Punkt a, so öffnet er S_5 . Damit wird R_8 ganz in den Motorstromkreis geschaltet und die Folge ist eine langsamere Reagensausschüttung.

Beim Erreichen des Äquivalenzpunktes öffnet der Zeiger den Schalter S_4 , die Reaktion steht still, weil der Bürettenhahn geschlossen wird.

Praktisch ist dieser Apparat schon ein pH - Regelgerät. Der Äquivalenzpunkt entspricht hierbei dem Sollwert. Man muß nur den beschriebenen Schaltmechanismus auf beiden Seiten des Sollwertes anbringen und statt des einfachen Gleichstrommotors einen Umkehrmotor verwenden, damit Sollwertabweichungen nach beiden Seiten beantwortet werden können.

Registrierendes Autotitrationsgerät von Jacobsen und Leonis (17)

Der sogenannte "automatische Titrator" ist zur Regelung aller Reaktionen bestimmt, in denen eine Ionenkonzentrationsänderung die Änderung eines Elektrodenpotentials bewirkt. Er wurde speziell erprobt an Reaktionen, in denen Wasserstoffionen produziert oder verbraucht wurden. Das Gerät ist nach den Prinzipien von Lingane aufgebaut. Es hat den Vorzug, billiger zu sein, und kann vor allem aus Fertigteilen zusammengesetzt werden, die in Europa erhältlich sind.

Prinzip

Der pH - Wert der Regelflüssigkeit wird mit einer geeigneten Elektrode festgestellt und von einem direkt ablesbaren Meßgerät angezeigt. Hinter das Meßgerät ist ein elektromagnetisches Relais geschaltet. Weicht auf Grund eines Mangels (bzw. Überschusses) an zuzusetzendem Reagens das Elektrodenpotential von dem Sollwert ab, so bringt das Relais eine motorgesteuerte Spritzbürette in Gang, die dem Reaktionssystem Reagens zusetzt und dadurch das gewünschte Potential wieder herstellt. Der Büettenantrieb bewegt zusätzlich eine Schreibfeder um eine Strecke, die der Menge von verbrauchtem Reagens aus der Bürette proportional ist. Ein Synchronmotor bewegt das Papier, auf das die Feder schreibt, senkrecht zu der Federbewegung.

Ausführung

Als Elektrode wird die Glaselektrode nach Cannon mit $\text{Ag} - \text{AgCl}$ - Bezugselektrode empfohlen. Sie bewährte sich besonders in kleinen Flüssigkeitsmengen und in Gegenwart starker Extraströme.

Da aber organische Substanzen die Gummidichtung der Elektrode angriffen, wurde eine Voll - Glaselektrode (G) konstruiert, bei der die Flüssigkeits - Flüssigkeitsverbindung in einem Asbestgeflecht stattfindet, das in das Glas des Schirmes eingeschmolzen ist. Sollte der Bulbus brechen, so kann man leicht einen neuen blasen unter Auftropfen eines bißchen geschmolzenen Corningglases auf die Spitze des Kapillartubus.

Zur pH - Messung wird das wechselstrombetriebene PHM 22 der Firma Radiometer, Kopenhagen, verwendet. Nach kurzer Anwärmzeit hat dieses Instrument keine erkennbare Abweichung und erlaubt deshalb, das Studium von Reaktionen, die viele Stunden dauern, ohne Nullpunktskontrolle. Es hat Steckkontakte zum Anschluß eines in Serie geschalteten 500 - Ohm - Registrierapparates an das Galvanometer, so daß das elektromagnetische Relais angeschlossen werden kann, ohne die Galvanometerleitung zu unterbrechen.

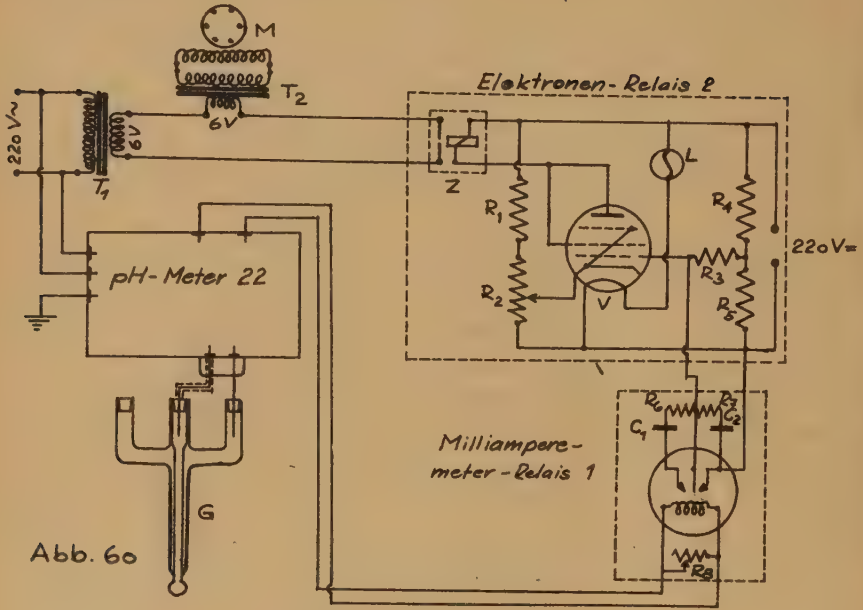
Das elektromagnetische Relais (1) ist ein 500 - Ohm - Milliampere-meter $\pm$ 5 mA. Der Zeiger ist auf 2,5 cm gekürzt. Der Kontakt wird hergestellt zwischen dem Zeiger und einem zu berührenden Punkt (auf der Skala des Meßinstrumentes angebracht), der zur groben Regulierung in einer halbkreisförmigen Rinne beweglich ist, deren Kreismittelpunkt mit dem des Zeigers zusammenfällt. Zur Feineinstellung des Relais ist ein 400 Ohm Schiebewiderstand nebengeschlossen.

Da die Belastung, die durch das Relais kontrolliert werden soll, mehrere Watt beträgt, ist es unvorteilhaft, das Milliampere-relais direkt zu verwenden, denn der Funkenschlag würde an den Kontaktstellen einen untragbaren elektrischen Fehler im Stromkreis verursachen. In diesem Fall wird das mA - Meterrelais dazu verwendet, ein einfaches Elektronenrelais (2) zu steuern, das seinerseits den Motor (M) steuert. Das Elektronenrelais, das aus gewöhnlichen Radioteilen hergestellt werden kann, erwies sich als sehr empfindlich. Es wurde beschrieben von J. Jeener, Brüssel (private Veröffentlichung). Der Steuerstrom ist der Bruchteil eines mA, was bedeutet, daß das Funkensprühen an den Kontakten und die Einführung eines Extrastromes vermieden werden.

Die elektrischen Störungen auf Grund eines Abreißens des Motorstroms können vermieden werden. Man verwendet dazu 2 Transformatoren (T_1 und T_2), deren Niederspannungssekundärleitungen durch die Relaiskontakte wieder untereinander verbunden sind. Das Schalt-schema zeigt Abbildung 60.

Die Motoren für den Registrierapparat sind kleine Wechselstrommotoren. Da sie keine Bürsten besitzen, bringen sie keinen elek-

trischen Fehler in das System.



T_1, T_2 : 6 Volt Transformatoren

M: Motor

Z: 30 mA - Relais

R_1 : 10 Kohm 5 W

R_2 : 2 Kohm 5 W

R_3 : 5 Mohm 1 W

R_4 : 270 Kohm 1 W

R_5 : 150 Kohm 1 W

R_6 : 125 Ohm

R_7 : 125 Ohm

R_8 : 400 Ohm

C_1 : 0,1 F

C_2 : 0,1 F

V: UL 41

L: Kohlelichtbogen

G: Glaselektrode

1: Milliampere-meter-Relais

2: Elektronenrelais

Der Antrieb für die Zeitachse des Registrierapparates ist ein Motor, der mit der Uhrzeit synchron läuft (Haydon), 1 U/Min, während der Motor, der die Schreibfeder bewegt und die Bürette öffnet, ein etwas größerer Motor vom Typ Warren ist.

Das Rühren in der Reaktionsflüssigkeit wird durch einen kleinen, gut abgeschirmten 6 - Volt - Gleichstrommotor durchgeführt. Der Platinrührer ist von der Motorwelle durch ein Gummizwischenstück

isoliert. Es wurden keinerlei elektrische Störungen durch diesen Motor beobachtet, außer einer geringen Vibration der Relaiskontakte und des Zeigers des pH - Meßgerätes. Das Vibrieren der Galvanometernadel entspricht etwa 0,5 mV.

Die Vibration ist jedoch recht vorteilhaft, da sie eine Stockung des Relaiskontakts und damit ein Überschießen der Reagensausschüttung verhindert. Nun wird entsprechend dem bestehenden Betriebspotential Reagens aus der Bürette in kleinen Mengen von etwa 0,05 Mikrolitern (entsprechend etwa 1/4 Motordrehung) ausgeschüttet.

Die Abschirmung ist nur nötig bei den Leitern der Glaselektrode und des kleinen Rührwerks. Als Leiter von der Glaselektrode wird die innere leitende Schicht eines Koaxialkabels verwendet, wobei der Schirm (geflochtener Kupferdraht) zur Verbindung der Bezugselektrode mit ihrem Steckkontakt dient. Der Kontaktpunkt für die Bezugselektrode sollte außen am Gehäuse des geerdeten pH - Meßgeräts angebracht sein.

Das Registriergerät (Abb. 61) wurde von O. Dich, Kopenhagen, ge-

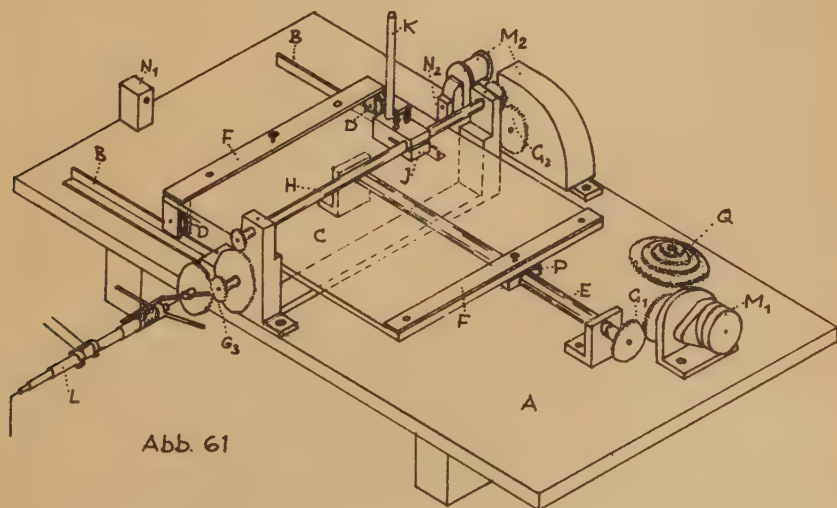


Abb. 61

baut. Die Grundlage bildet ein Holzbrett A, auf das zwei Stahlschienen B aufgeschraubt sind. Der Lucitewagen C rollt auf den Schienen mit 2 Rädern D. Er wird bewegt durch die Zeitachsenführungsschraube E (1 mm Ganghöhe), die selber wieder durch den Synchronmotor M_1 über das Zahnradgetriebe G_1 gedreht wird. Die untere Hälfte der Schraubenmutter F auf der äußersten rechten Seite des Wagens, die den Schlitten mit der Führungsschraube verbindet, ist abgeschlagen. Durch Heben der rechten Seite des Schlittens kann dieser nach Beendigung des Experiments in die Ausgangsstellung zurückgebracht werden, ohne daß die Führungsschraube ganz zurückgedreht werden müßte. Das Schreibpapier ist auf dem Schlitten befestigt durch die Klemmleisten F.

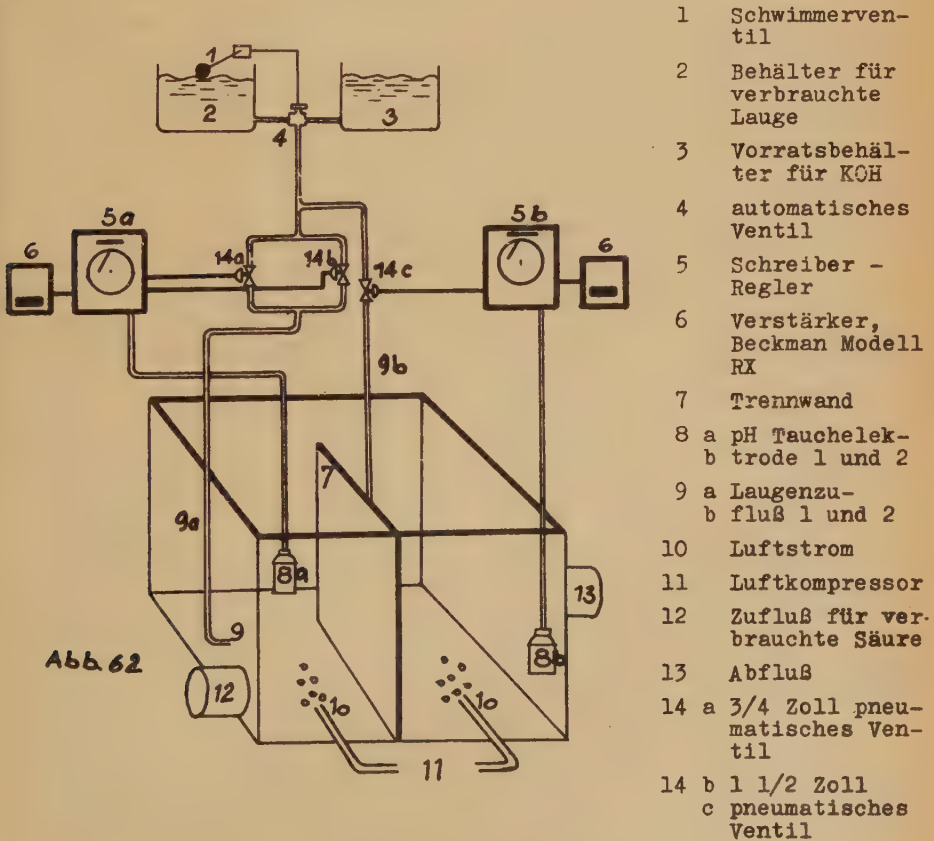
Eine andere Führungsschraube H (1 mm Ganghöhe) wird senkrecht zur Zeitachsenführungsschraube E befestigt. H trägt eine Klampe J (durchgesägt, federbelastet). J trägt einen Bleistift oder eine Schreibfeder K. Die Drehrichtung von H ist solcherart, daß der Stift leicht gegen das Papier gedrückt wird. H wird durch einen Motor (M_2) veränderlicher Rotationsgeschwindigkeit über das Zahngetriebe G_2 angetrieben. M_2 wird durch das Elektronenrelais gesteuert. Die Führungsschraube H bewegt den Bürettenverschluß L über das Getriebe G_3 (Agla Micrometer Syringe; Borrozgs Welcome, London).

Die Endschalter N_1 und N_2 steuern ein Relais (nicht gezeichnet), das den Strom für das ganze System ausschaltet, wenn der Wagen C oder die Klampe J ihre Endstellung erreicht haben, wodurch Beschädigungen an den Führungsschrauben vermieden werden. In der Leitung zum Zeitachsenschalter M_1 ist ein Schalter vorgesehen, so daß der Wagen im Augenblick des Reaktionsbeginns in Bewegung gesetzt werden kann.

Für die Getriebe G_1 und G_2 sowie G_3 ist eine Anzahl Getriebebesätze Q vorgesehen. Mit einem Synchronmotor M_1 von 1 U/Min kann die Zeitachsengeschwindigkeit entsprechend 1, 2, 4 und 5 mm pro Minute gewählt werden. Mit der Agla Spritzbürette und einer Geschwindigkeit der Getriebewelle des Motors M_2 von 1 U/Min (Höchstgeschwindigkeit) kann eine Zugabegeschwindigkeit von 5 bis 125 Mikroliter pro Minute und eine Federverschiebung von 0,55 bis 2,5 mm

pro Mikroliter erreicht werden.

Wenn das Registriergerät richtig eingestellt ist, wird die vom Gerät aufgezeichnete Kurve vollkommen gleichmäßig und Geschwindigkeitskonstanten, die aus weit auseinanderliegenden Kurventeilen errechnet werden, stimmen überein. Unregelmäßigkeiten in der Kurve können entstehen, wenn die Glaselektrode vergiftet ist (wie es in organischen Lösungsmitteln oft geschehen kann) oder wenn die Kontakte des mA - Meter - Relais schmutzig sind. Alkoholreinigung der Kontakte wird die Störung beseitigen.



pH - Regler für die Abwasserbeseitigung der Firma Beckman (18)

Ein pH - Regler mit pneumatischem Kraftschaltglied wurde von der Firma Beckman für die Einstellung von Industrieabwässern auf den Neutralpunkt entwickelt.

Aufgabe war, die bei der Herstellung von Autobatterien verbrauchte Säure mindestens auf einen pH - Wert von 6 als Grenzwert zu bringen, ehe sie in die gemeindliche Abwasserleitung gegossen wurde.

Zur Neutralisierung der Säure war in genügender Menge Kalilauge vorhanden, die in einem anderen Fabrikationsprozeß abfiel. Menge und Konzentration der verbrauchten Säure schwankten stark, so mußte das Regelsystem nicht nur besonders anpassungsfähig und empfindlich gemacht werden, sondern es war auch wichtig, ihm eine ausreichende Kapazität zu geben. Außerdem wurde eine dauernde Registrierung des Neutralisationsvorganges gefordert.

Abb. 62 zeigt ein schematisches Diagramm der Anlage. Verbrauchte Säure fließt aus dem Werk in ein kleines Becken aus säurefesten Ziegeln, die mit Vitrabond verbunden sind. Das Becken ist durch eine Wand in zwei Teile geteilt. Der Zufluß Nr. 1 für die Kalilauge (10 a) befindet sich neben dem Zuflußrohr für die verbrauchte Säure (13). Der Zustrom der Lauge wird durch einen pneumatischen Regler, über das pH - Meter Nr. 1 (5 a), dessen Elektrode (8 a) neben der Trennwand sitzt, gesteuert. Der Zustrom der Kalilauge erfolgt aus einem Behälter für verbrauchte Lauge (2), der sich in der Fabrik befindet. Ein Schwimmerventil (1) schließt für den Fall, daß alle verbrauchte Lauge abgeflossen ist, diesen Behälter und öffnet dafür einen Behälter mit konzentrierter Kalilauge (3). Dieser Behälter mit konzentrierter Kalilauge wird normalerweise als Hauptvorratsbehälter für einen bestimmten Produktionsvorgang verwendet. Ein Summer und eine Lampe geben Signal, wenn der Behälter mit verbrauchter Kalilauge leer ist. Der Zufluß Nr. 1 (9 a) der Lauge wird durch ein $3/4$ zölliges (14 a) und ein $1\frac{1}{2}$ zölliges (14 b) pneumatisches Ventil gesteuert. Ist der Bedarf an Kalilauge gering, wird nur das $3/4$ zöllige Ventil benutzt. Ist dagegen der Bedarf an Kalilauge hoch, tritt auch das $1\frac{1}{2}$

Zoll - Ventil automatisch in Funktion. Der pH - Schreiber Nr. 1 (5) ist auf einen Sollwert von $\text{pH} = 6,5$ eingestellt. Die nötige Durchmischung in den beiden Teilen des Beckens wird durch Hindurchblasen von Luft (10) erreicht, die vorher durch den Kompressor (11) verdichtet wurde.

Ein zweites pH - Verstärker Modell RX mit Schreiber und pneumatischem Regler (5 b) überwacht den zweiten Teil des Beckens. Die pH - Elektrode (8 b) befindet sich neben der Auslaßöffnung für das Abwasser (13). Die Laugenzufuhr für diesen Teil des Beckens erfolgt neben der Trennwand über die die Säure von der anderen Hälfte des Beckens herüberströmt. Auch hier wird die Laugenzufuhr durch ein pneumatisches Ventil geregelt (14 c). Der pH - Schreiber Nr. 2 (5 b) ist auf einen Sollwert von $\text{pH} = 6,8$ eingestellt. Dieser zweite Regelkreis dient einzig und allein dem Zweck einer besseren Kontrollmöglichkeit des pH - Wertes des Abwassers, ohne daß dafür große Sammelbecken nötig sind; und sie erlaubt eine gute Regelung des pH - Wertes bei relativ schnellem Durchfluß. Geht der Säuregehalt des zufließenden Abwassers rasch in die Höhe, dann kann das Regelsystem im ersten Teil des Beckens nicht schnell genug reagieren. Die Folge davon ist, daß ein kleiner Teil der ungenügend neutralisierten Säure in den zweiten Teil des Beckens gelangt. Tritt dieser Fall ein, so steuert das Kontrollsystem Nr. 2 den Laugenzufluß in das Becken Nr. 2 so, daß das Abwasser vollständig neutralisiert wird und daß nur vollkommen aufbereitetes Abwasser in die Kanalisation fließt.

Strahlrohrregler der Askaniawerke

Der Strahlrohrregler ist seinem Wesen nach ein integral wirkender Regler, der durch geeignete Zusätze zum PID - Regler umgebaut werden kann und sich in dieser Form als pH - Regler in der Papierindustrie bewährt hat.

Prinzip

Abb. 63 zeigt die Wirkungsweise des Strahlrohrreglers. Dem um die Achse A schwenkbaren Strahlrohr S wird über Zulauf Z Drucköl, oder in Einzelfällen auch Druckluft, als Hilfskraft zugeführt, die aus

der düsenförmig verengten Spitze des Strahlrohres mit großer Geschwindigkeit austritt. Der Strahl trifft auf zwei im Druckaufnehmer D (Abb. 63, a - c) unmittelbar nebeneinander liegende Öffnungen 3 und 4 von gleichem Durchmesser. Der Druckaufnehmer ist durch

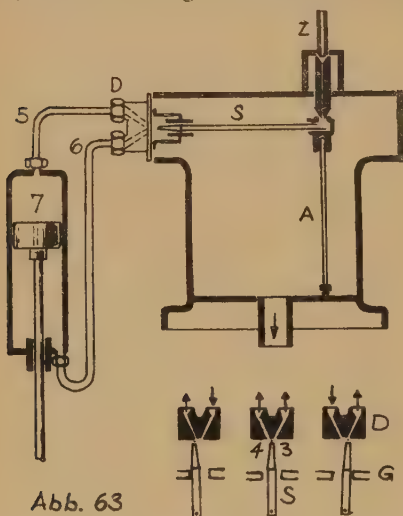


Abb. 63

die Leitungen 5 und 6 mit den beiden Seiten eines Arbeitskolben 7 verbunden. Die Strömungsenergie des Strahles setzt sich beim Auftreffen auf den Druckaufnehmer wieder in Druck um. Steht das Strahlrohr in Mittellage, so ist der Druck auf beiden Seiten des Steuerzylinders gleich groß; der Kolben 7 verharrt in Ruhe. Bei Ablenkung des Strahlrohres wird der Druck, entsprechend der Abweichung, auf der einen Seite größer, auf der anderen

kleiner. Es entsteht ein Druckunterschied und damit eine Verstellkraft, die den Kolben in dem Maße bewegt, wie Drucköl nachströmt. Das Regelorgan (Ventil, Drosselklappe) wird dadurch so lange verstellt, bis wieder Gleichgewichtszustand zwischen Meßsystem und Einstellsystem hergestellt ist, also das Strahlrohr wieder in Mittellage steht.

Die erreichbare Regelgeschwindigkeit hängt von der aus dem Strahlrohr austretenden Ölmenge ab und wird durch ein Drosselventil auf den günstigsten Wert eingestellt.

Ausführung

Der serienmäßig hergestellte Regler Thermolus (20) ist zwar, wie der Name schon sagt, für die Temperaturregelung gedacht, doch kann man ihn als PID - Regler auch für die pH - Regelstrecken verwenden.

Thermolus A arbeitet mit einem empfindlichen, reibungslos aufgehängten Galvanometersystem 1, siehe Abb. 64, dessen Zeiger 9 über einer Anzeigeskala spielt. Mit dem beweglichen Rähmchen 2 des

Galvanometers ist ein kleines luftgespeistes Strahlrohr 3 verbunden, aus dem in radialer Richtung ein feiner Luftstrahl wie ein unsichtbarer Zeiger austritt. Dieser Luftstrahl trifft auf eine

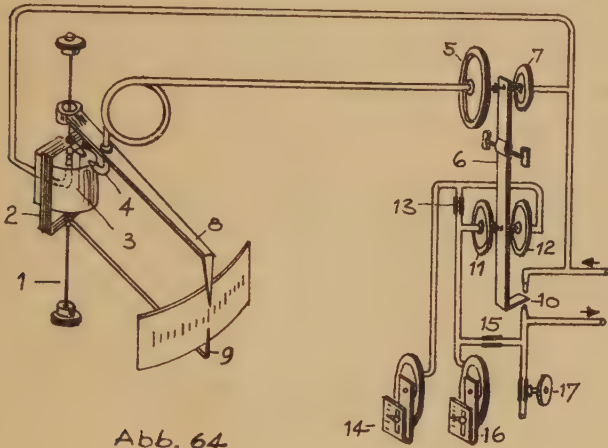


Abb. 64

am Sollwertzeiger angebrachte Aufnahmedüse 4 und erzeugt darin einen Luftdruck, der, je nach Stellung des Luftstrahls, zwischen Null und einem Maximalwert veränderlich ist. Dieser Luftdruck wirkt über eine Membran 5 auf den Waagebalken 6 eines pneumatischen

Wandlers und wird verglichen mit dem Druck einer zweiten Membran 7, die an die Vordruckleitung des Strahlrohrs angeschlossen ist. Auf den Waagebalken drückt damit eine resultierende Kraft, die bei einer bestimmten Stellung des Luftstrahles vor der Aufnahmedüse Null ist und in der einen oder anderen Richtung anwächst, sobald der Luftstrahl von dieser Stellung abweicht. Diese Kraft ist proportional der Regelabweichung, die durch die Stellung der Aufnahmedüse gegeben ist. Der Sollwert kann durch einen Zeiger 8 über dem Galvanometer eingestellt werden, während Zeiger 9 den Istwert anzeigt. Stehen beide Zeiger genau übereinander, so ist die Regelabweichung gleich Null.

Der Waagebalken des Wandlers trägt an seinem freien Ende ein kleines Messer 10, das einen Luftstrahl zwischen zwei Düsen je nach seiner Stellung mehr oder weniger abschneidet und dadurch den Ausgangsdruck zum Stellmotor in der Leitung 18 steuert. Außerdem werden durch den Ausgangsdruck zwei weitere Membranen 11 und 12 so beeinflusst, daß ihre Momente demjenigen des Membranpaares 5 und 7 das Gleichgewicht halten. Tritt eine Abweichung der Regelgröße vom Sollwert ein, so ist die Druckdifferenz der Membranen 11 und 12 der Regelabweichung direkt proportional. Nun ist aber vor die Mem-

bran 12 eine Glaskapillare 13 geschaltet, durch die eine der Druckdifferenz der Membranen entsprechende Luftmenge strömt, so daß der Druck an der Membran 12 gleich Druckdifferenz $\times$ Zeit ist, d. h. dem Zeitintegral der Regelabweichung entspricht. Die Zeitkonstante dieser Anordnung wird durch die Größe der Kapillare 13 und den einstellbaren Luftbehälter 14 (pneumatischer Kondensator) bestimmt.

Eine weitere Drosselkapillare 15 in Verbindung mit einem einstellbaren Luftbehälter 15 ist vor der Dose 11 angeordnet. Die an dieser Kapillare auftretende Druckdifferenz ist ein Maß für die jeweilige Luftmenge, die zur Änderung des Druckes an der Membran 11 erforderlich ist. Sie ist also proportional der Änderungsgeschwindigkeit dieses Druckes und damit proportional der Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße. In der Steuernleitung 18 entsteht also ein Druck, der sich aus folgenden Summanden zusammensetzt:

- a) Druckunterschied von Dose 11 und 12 (= Regelabweichung x),
- b) Druck in Dose 12 (= Zeitintegral von x),
- c) Druckunterschied an Kapillare 15 (= Änderungsgeschwindigkeit von x).

Vor den Wandler ist ein pneumatischer Spannungsteiler geschaltet. Bei geschlossener Drossel 17 ist wegen der Gegenwirkung der Membrandose 11 und 12 eine verhältnismäßig große Regelabweichung erforderlich, um den Ausgangsdruck in Leitung 18 zwischen Null- und Voll-Last auszusteuern. Bei teilweise oder ganz geöffneter Drossel 17 genügt dafür eine viel kleinere Regelabweichung, und man kann demnach den für eine gute Schwingungsdämpfung erforderlichen Proportionalbereich einstellen.

Die Druckluft zum Betrieb des Reglers wird von einem kleinen, ventillosen Resonanz-Luftpresser geliefert, wobei die Betriebsluft im Gehäuse nur umläuft, also staub und ölfrei bleibt.

Durch eine Sicherungsschaltung wird bei Versagen des Stellgliedes eine Überregelung verhindert und ein Alarmzeichen gegeben.

Als Zusatzgerät zu ihrem Regler stellen die Askaniawerke auch eine

Reihe von Schreib- und Registriergeräten her.

Regelux 3 von Hartmann & Braun (21)

Der PID - Regler, Regelux 3, wird von der Herstellerfirma für pH - Regelzwecke sehr empfohlen.

Prinzip

Das Gerät arbeitet mit lichtelektrischer Abtastung des Meßwertzeigers. Jede Abweichung der Regelgröße vom Sollwert ruft eine proportionale Änderung des Photostroms hervor. Wird dieser verstärkt, so kann er verwendet werden, um das Stellglied des Reglers der Sollwertabweichung entsprechend zu verstellen. Besitzt das Stellglied stetige Wirksamkeit (z. B. durch Motorantrieb), so wirkt auch der Regler Regelux 3 stetig, denn die lichtelektrische Verbindung zwischen dem die Meßspule durchfließenden Meßstrom und dem Photowiderstandsstrom (Reglerausgangsstrom) reißt nie ab.

Ausführung

Bei dem Regler Regelux 3 spielt eine elektrische Zeiger - Rückführung die entscheidende Rolle (s. Abb. 65).

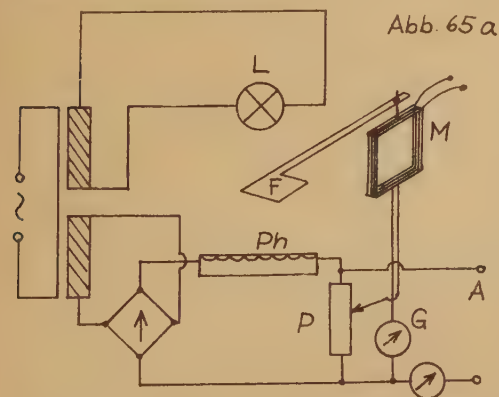


Abb. 65 a

Abb. 65 a:

An einem zu den Ausgangsklemmen des Reglers (A) parallel liegenden Widerstand (P) wird eine einstellbare Teilspannung abgegriffen, die in einer zweiten Wicklung des Meßwerkes (M), der Rückführwicklung, einen gegenwirkenden Strom hervorruft. Weicht die Regelgröße vom Sollwert ab und wandert der Zeiger (F) aus dem Lichtstrahl aus, so wird der Photowiderstand so lange anders belichtet, bis auch der gegenwirkende Rückführstrom eine dieser Abweichung entsprechende Größe angenommen hat. Die Fahne des Meßwerkzeigers befindet sich daher immer

der Zeiger (F) aus dem Lichtstrahl aus, so wird der Photowiderstand so lange anders belichtet, bis auch der gegenwirkende Rückführstrom eine dieser Abweichung entsprechende Größe angenommen hat. Die Fahne des Meßwerkzeigers befindet sich daher immer

im Lichtstrahl.

Damit der Reglerausgangsstrom verschiedene Werte annehmen kann, muß die Meßzeigerfahne verschieden tief in den Lichtstrahl eintauchen. Dieser Bereich ist zur Erzielung einer guten Regelgenau-

igkeit sehr schmal, eine Änderung des Meßwertes der Regelgröße um 1 % des Skalenumfanges ändert den Ausgangsstrom bereits über seinen ganzen Bereich. Der Meßwerkzeiger steht daher

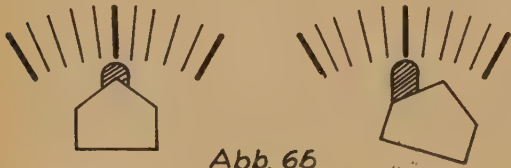


Abb. 65

praktisch immer auf demselben Wert, dem Sollwert. Die jeweiligen Abweichungen der Regelgröße vom Sollwert sind somit an dem Meßwerkzeiger nicht zu erkennen, sie wirken sich jedoch in einer Änderung des Rückführstromes aus und werden von einem besonderen kleinen Instrument G als "Abweichung" angezeigt. Die Sollwertmarke ist so ausgeführt, daß der schwarze Meßwertzeiger beim normalen Betrieb hinter der roten Marke verschwindet. Der vom Regler abgegebene Steuerstrom wird von einem zweiten kleinen Anzeigeinstrument angezeigt.

Das P - Verhalten des Reglers ist durch die soeben beschriebene starre Rückführung gegeben. Da die Abweichung des Meßstromes vom Sollwert (Regelabweichung) dem Rückführstrom proportional ist und

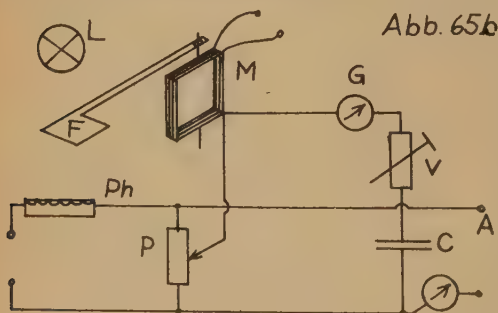


Abb. 65b

da weiterhin der Rückführstrom dem Reglerausgangsstrom proportional ist, besteht ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Regelabweichung und dem Reglerausgangsstrom. Der Proportionalbereich x_0 ist am Einstellwiderstand P einstellbar. Der Reglerausgangsstrom dient dem Betrieb

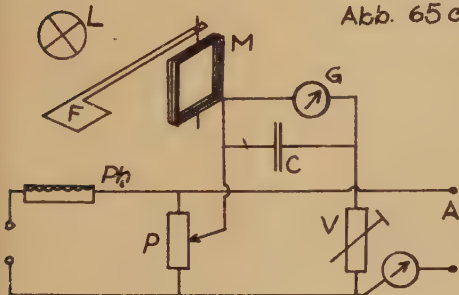
des Stellmotors für das Bürettenventil.

Das I - Verhalten des Reglers wird erreicht, indem der Rückführstrom nach einer bestimmten einstellbaren Zeit (Nachstellzeit)

über eine Kondensatorschaltung zum Verschwinden gebracht wird (nachgebende Rückführung). In dem Rückführstromkreis befinden sich dabei ein Kondensator und ein Widerstand (s. Abb. 65 b). Der Rückführstrom fließt nur während der Ladungsänderung des Kondensators, die Nachstellzeit kann am Widerstand eingestellt werden.

Beim Auftreten einer Regelabweichung ändert der Regler den Ausgangsstrom auf einen durch die Rückführung begrenzten Wert. Infolge des langsamen Verschwindens der Rückführung wächst der Strom jedoch so lange an, bis über das Stellglied die Regelabweichung wieder vollkommen beseitigt ist. Der Reglerausgangsstrom hängt somit auch von der Zeitdauer der Regelabweichung, d. h. vom Zeitintegral der Regelgröße ab.

Abb. 65 c



Das D - Verhalten des Reglers ergibt im ersten Augenblick eine große Änderung des Reglerausgangsstromes, er "hält vor" (verzögerte Rückführung), bis durch das Einsetzen der Rückführung der Strom wieder zurückgenommen wird. Je schneller sich die Regelgröße ändert, desto weniger kann die verzögert einsetzende Rückführung wirksam werden. Der Eingriff des Reglers hängt daher von der Änderungsgeschwindigkeit, d. h. dem Differentialquotienten, der Regelgröße ab. Technisch wird eine verzögerte Rückführung hergestellt (s. Abb. 65 c) durch einen Kondensator C, parallel zur Rückführwicklung. Der Rückführstrom setzt erst mit Ladungsänderungen des Kondensators - also verzögert - ein. Die Vorhaltezeit kann am Widerstand V eingestellt werden.

pH - Regler nach Meyer

Meßwerk und Kraftschalter

Der pH - Regler nach E. Meyer arbeitet mit einem lichtelektrischen Übertragungsglied. Der Zeiger des pH - Meßinstrumentes ist darum

mit einer Schattenfahne versehen. Er unterbricht in dem vorgewählten pH - Bereich den Lichtstrahl, der von einer spaltförmigen Lichtquelle durch die Skala des Meßinstrumentes zu einer Photozelle gesandt wird.

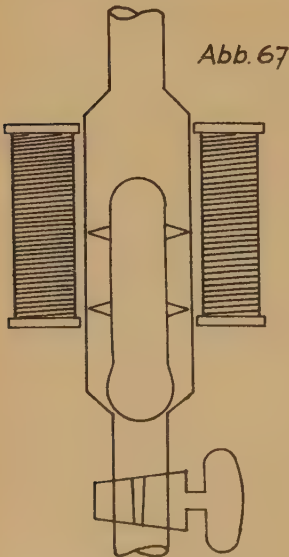
Bereits eine minimale Abweichung des Zeigers von seinem Sollwert führt zu einer Belichtungsänderung der Photozelle und damit zu einem veränderten Photostrom. Lichtquelle und Photozelle können mechanisch gegenüber der Skaleneinteilung verändert werden, so daß der Sollwert der Regelanlage einstellbar ist.

Der Photostrom der Zelle wird über eine Röhre verstärkt.

Stellmotor, Stellgetriebe, Stellglied

Der verstärkte Photostrom schaltet ein entsprechend empfindliches Relais und mit seiner Hilfe das Bürettenventil, das je nach der Art der Regelaufgabe verschieden ausgeführt sein kann.

1. Sollen nur kleine Flüssigkeitsmengen (bis 2000 cm^3) geregelt werden, so ist ein elektromagnetisches Ventil geeignet. Es besteht aus einem Schwimmer S mit Eisenkern, der eine Ausflußverengung der senkrecht stehenden Bürette B im Ruhezustand völlig abdichtet. Ein vom Photostrom gesteuerter Elektromagnet E ist an der Außenfläche der Bürette angebracht. Wird er erregt, so zieht er den Eisenkern des Schwimmers an, die Bürette öffnet sich.



Das elektromagnetische Ventil pendelt zwischen der Auf- und der Zu-Stellung hin und her. Verschieden starke und andauernde Regelimpulse werden mit einer verschiedenen langen Zeit beantwortet, die das Ventil geöffnet oder geschlossen bleibt.

Bei senkrecht stehender Bürette erfolgt der Reagensfluß durch hydrostatischen Druck.

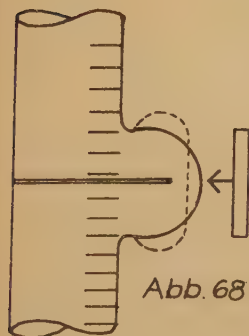
2. Bei der Regelung von Flüssigkeitsmengen über 2000 cm^3 ist die beschriebene Anordnung nicht ausreichend. Es empfiehlt sich ein Kugelventil aus Messing zu verwenden, dessen Verschlußkegel gegen die Kraft einer Feder mit Hilfe eines Elektromagneten geöffnet wird. Das Ventil ist in die Preßluftleitung einer Zerstäuberdüse eingeschaltet, die den Zufluß zum Reaktionsgefäß aus einem graduieren Vorratsbehälter ansaugt und fein zerstäubt.

Drosseln in der Preßluft- und Zustromleitung der Düse ermöglichen eine Regulierung des Zuflusses auf die benötigte Menge.

3. Bei Arbeiten mit größerem Überdruck im Reaktionsgefäß (über 70 mm Hg) eignet sich für die Regelung am besten ein Drehstrommotor, der den Kolben einer Einspritzpumpe bewegt. Die Kraftübertragung geschieht über ein stufenloses Getriebe, das die Drehgeschwindigkeit des Motors ändert, und über ein Schneckengewinde. Durch eine Änderung des Motordrehsinns kann die Einspritzpumpe aus einem Vorratsgefäß gefüllt werden.

Leistungsfähigkeit der Pegelanlage

Bei den einzelnen pH - Regelstrecken ist die Größenordnung der Störungen des Sollwertes verschieden. Von ihnen hängt jedoch die in der Zeiteinheit zur Regelung benötigte Reagensmenge ab.



Bei der beschriebenen Anlage wird der maximale Reagensfluß pro Zeiteinheit von Hand eingestellt (mit dem Hahn H, Abb. 67). Es ist jedoch geplant, auch hier die selbsttätige Regelung einzuführen. Eine Möglichkeit wäre z. B. (Abb. 68), die Bürette durch eine horizontale Trennwand fast völlig zu verschließen. In Höhe der Trennwand müßte die Büettenwand aus einem flexiblen Material hergestellt werden. Bei geringem Reagensbedarf würde sie von einem photostromgesteuerten Nullmotor nach innen

gedrückt im Sinne einer stärkeren Stenose, bei größerem Reagensbedarf rückte sie nach außen.

Verbesserung der lichtelektrischen Meßwertabtastung

Verwendet man statt einer Photozelle zur Abtastung der Galvanometerzeigerstellung zwei, so kann der Sollwert der Anlage noch genauer eingestellt werden.



Abb. 69

Die Photozellen Ph sind so angeordnet (Abb. 69), daß sie, wenn der Meßwertzeiger F auf dem Sollwert steht, gerade voll belichtet sind. Die Photozellen werden gegeneinander geschaltet; es fließt also, bei Sollwertstellung des Zeigers,

kein Strom.

Ändert sich der gemessene pH - Wert, so verschiebt sich die Schattenfahne und verdeckt einen Teil der einen Photozelle. Die Ströme der beiden Photozellen sind nun ungleich groß; sie heben sich nicht mehr gegenseitig auf.

Die Potentialdifferenz wird einem Nullmotor zugeführt, der durch seine Bewegung einen kompressiblen Bürettenteil abklemmt, bzw. einen Hahn dreht usw. Die Stellgliedverstellung geschieht dabei proportional zu der dem Motor zugeführten elektrischen Energie.

Der Nullmotor

Ließe man einen Umkehrmotor direkt vom Reglerausgangsstrom bedienen, so würde er sich, wegen seines Trägheitsmomentes, auf einen Impuls hin sehr lange Zeit drehen. Er soll jedoch zur Ruhe kommen, sobald der Sollwert erreicht ist. Dazu muß entweder das Trägheitsmoment klein gehalten oder die Stellgeschwindigkeit stark herabgesetzt werden. Durch eine Schaltung im Ohmschen Stromkreis wird das verwirklicht (Abb. 70). Der Motor wird für den Sollwert der Regelgröße mit Hilfe des Schiebewiderstandes 1 auf stromlos gebracht. Weicht der Meßwert vom Sollwert ab, so bekommt der Motor

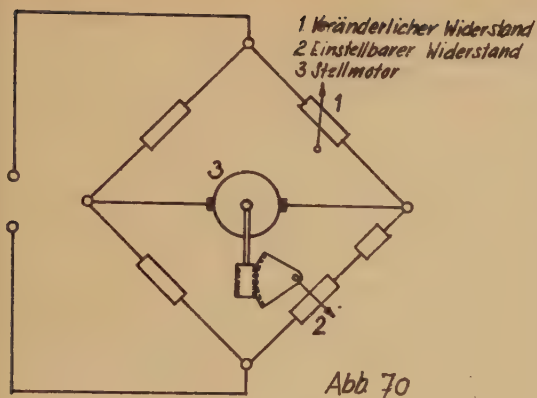


Abb 70

einen Impuls und fängt an, sich zu drehen. Dabei ver- stellt er den Bürettenver- schluß. Außerdem verändert er den Widerstand 2 in einer Richtung, die dem antreibenden Impuls ent- gegengesetzt ist. Dadurch wird das Brückengleichge- wicht wieder hergestellt, der Motor ist erneut strom- los.

Registrierung

Der in jedem Zeitpunkt der Reaktion gemessene pH - Wert wird mit Hilfe eines Fallbügelschreibers aufgezeichnet.

Häufig ist es wünschenswert, zusätzlich auch noch das der Regel- flüssigkeit zugesetzte Volumen an Reagens zu registrieren. Man bringt dazu (Abb. 71) die Bürette in das elektrische Feld zwi- schen zwei Kondensatorplatten C, die von einer Wechselstromquelle mit 100 Hz und 500 V gespeist werden. Schließt man die Kondensatoren nach Gleichrichtung des Stroms (Gleichrichterröhre usw.), über ein Galvanometer G kurz, so findet man, daß die Stromstärke in dem Kreis sich pro- portional zur Höhe des Flüssigkeitsspie- gels ändert und zwar wächst der Wider- stand des Kreises mit abnehmendem Flüs- sigkeitsspiegel. Ist die Bürette leer, so fließt also nur ein sehr geringer Strom.

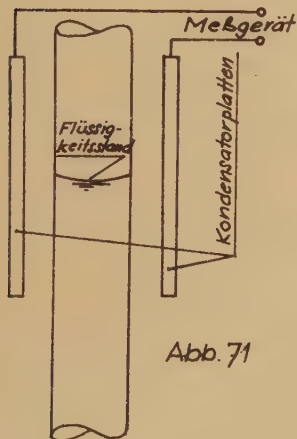


Abb. 71

Sorgt man für eine ständige Aufzeichnung des Galvanometerstromes, so kann man aus der aufgezeichneten Kurve die Änderung der zum Regelgemisch zugeflossenen Reagensmenge in der Zeiteinheit für jeden beliebigen Zeitpunkt ermitteln.

Druck- und Temperaturregelung

Der Druck im Reaktionsgefäß kann mittels eines Ventils auf einem vorwählbaren Stand erhalten werden. Dies ist vor allem nötig, um eine richtige Funktion der Zuflüsse zu gewährleisten.

Die Konstanz der Temperatur im vorgewählten Bereich wird in Wasserthermostaten mit automatischer Temperaturregelung erhalten. Sollen die Reaktionsgefäße nicht unter Wasser verwendet werden, kann eine spezielle Beheizung mit Temperaturregelung eingerichtet werden. In diesem Falle müßte ein Temperaturfühler in das Reaktionsgefäß eingeführt werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Titration und pH - Regelung unterscheiden sich sehr wesentlich voneinander.

1. Bei der Titration soll ein bestimmter Endpunkt, der sich bei elektrometrischer pH - Messung durch einen deutlichen Potential-sprung von seinen Nachbarwerten unterscheidet, festgestellt werden. Aufgabe der pH - Regelung hingegen ist es, einen vorgewählten pH - Wert, der ohne die Regelung ständig durch irgendwelche Störgrößen verändert werden würde, durch Säure oder Laugenzufuhr möglichst konstant zu halten. Je weniger der pH - Wert der Meßlösung nach einer Störung vom Sollwert abweicht, desto wirkungsvoller ist die Regelung. Das aber bedeutet, daß dem Regler nur ein sehr geringer Eingangsstrom zu Regelzwecken zur Verfügung steht. Aus diesem Grund müssen die Geräte zur automatischen pH - Regelung wesentlich empfindlicher sein, als die zur Titration.

2. Titrationslösung und Titriergerät sind einfach hintereinandergeschaltet. Regelflüssigkeit und Regler jedoch bilden einen Schwingkreis, in dem ein jedes Glied das nachfolgende beeinflusst. Es wirkt also nicht nur der Regler auf die Regelflüssigkeit ein, sondern diese gibt auch wieder Impulse an den Regler zurück. Jede einzelne Störung innerhalb des Regelkreises führt zu Schwingungen, die gedämpft, ungedämpft und sich aufschaukelnd verlaufen können. Je weniger gedämpft sie sind, desto ungenauer ist die pH - Regelung.

Um Regelschwingungen so weitgehend wie möglich zu dämpfen, werden Stabilisierungseinrichtungen in den Regelkreis eingeführt und zwar:

- a) gegen die Schwingungen, die im Bereich des Reglers entstehen: Rückführung, Unterbrecher und Bremsen.
- b) Schwingungen, die durch die Trägheit der pH - Regelstrecke hervorgerufen werden, sind am wirkungsvollsten durch ein Regelgerät mit proportional, integral und differential wirkendem Glied zu beseitigen (PID - Regler), unterstützt von einer ständigen guten Durchmischung der Regelflüssigkeit. Damit wird für schnelle Auswirkung einer störenden Kraft auf die Elektroden, also für eine möglichst geringe Verzögerung im Bereich der Strecke gesorgt. Auch ein Regler mit unstetig wirkendem Regelglied bewährt sich

bei der trägen pH - Regelstrecke sehr gut, da die zeitweise Unterbrechung des Kreises keine aufklingenden Schwingungen im Kreis entstehen läßt.

Optimale pH - Regelergebnisse erhält man mit einem PID - Regler. Allerdings sind hierbei schwierige und zeitraubende Berechnungen erforderlich, um die beste Einstellung für die Vorhaltglieder zu ermitteln. Dieses Gerät eignet sich daher nur für Regelaufgaben über lange Zeiträume hin.

Will man jedoch an einem Tag mehrere Regelaufgaben durchführen, wie z. B. die Beobachtung der Wirksamkeit eines Fermentes bei konstantem pH - Wert, so verwendet man besser einen weniger komplizierten Regler.

Da die Regelgenauigkeit um so größer wird, je kleiner die Differenz zwischen maximaler Sollwertabweichung und dem Sollwert ist, empfiehlt sich bei pufferarmen Regellösungen bei Verwendung eines einfachen Reglers noch eine gewisse Vorpufferung. Sie hat den Vorteil, daß auch bei größeren Störungen der pH - Wert der Meßlösung nicht allzu weit von seinem Sollwert abweicht, und so leichter wieder auf seinen Ausgangspunkt zurückgeführt werden kann. Mit dieser Kombination erhält man auch bei schwierigen Regelstrecken für die Praxis sehr brauchbare Regelergebnisse.

AUTORENVERZEICHNIS

1. über die Grundlagen der elektrometrischen pH - Messung:
Michaelis, "Die Wasserstoffionenkonzentration", 1923;
Kordatzki, Taschenbuch d. prakt. pH - Messung, 1949. Ostwald -
Luther, Physiko-Chem. Messungen, 1925, S. 481 - 485

Bezugselektroden:

Adam Frauendorfer, D.R.P. 847362 u. 871970, 1941, Elektr. zur Spannungserzeugung f. Wasserstoffionenkonzentrationsmessung u. dergl.; H. Gerdes, D.R.P. 825905, 1948, Verf. z. Behandl. v. zur Messung von Ionenkonz. dienenden Silberhalogenid-El.; Kordatzki, Taschenbuch d. prakt. pH-Mess., 1949, S.28-33, S.93; Dr. L. Kratz, D. R. P. 746945, 1938, Bezugstauchelektrode f. d. Messung von Ionenkonz. in Lösungen; Dr. Alfred Naumann, D.R.P. 923221, 1943, Einrichtung z. Messung od. Regelung von pH-Werten; Dr. Fritz Lieneweg, D.R.P. 859539, Verf. z. Herstellung v. unmittelbar in d. Meßlg. eintauchenden Vergleichel.f.pH- u. ähnl. Messungen; Dr. Ing. F. Tödt, D.R.P. 865547, Bezugsel. z. Best.oxyd.Stoffe sowie d. pH-Wertes.

Meßelektroden:

Wasserstoffelektrode Dr. Heinz Größ u. Dr. Ing. Fritz Lieneweg, D.R.P. 623846, 1934, Platinwasserstoffelektrode insbes.z.fortlaufenden Messung d. pH-Wertes von Flüssigkeiten; Halban u. G. Kortüm, Zeitschr.f.Elektrochem. 1933, S.289; Die Größenordnung des Wasserstoffeffektes; Kordatzki, D.R.P. 578342, 1930, Einrichtung z. kontinuierl.Mess.d.Wasserstoffionenkonz. von Flüssigk.m.Platinwasserstoffel.; Dr. Ludwig Kratz, D.R.P. 698239, 1938, Wasserstoffel.z.Messen d. Wasserstoffionenkonz. v. Lösungen; Kuhn, D.R.P. 485738, 1926, Vorrichtung z. potentiometr. Bestimmung d. Wasserstoffionenkonz. von Lösungen; Tödt, Zeitschr.f.Elektrochemie, 1932, S.12, Über den Wasserstoffeffekt; L. Wolf; Zeitschr.f.Elektrochem., 1930, S.803, Über d.Best.d.Wasserstoffionenkonz.bei Gegenwart von Neutralsalzen; 1931, S.622, Über den Wasserstoffeffekt, 1932, S.622, Über d. Wasserstoffeffekt; Dr. P. Wolski, D.R.P. 742688, 1940, Verfahren u. Vorrichtung z. kontinuierl. Messung od. Aufzeichnung d. Acidität stark alkal. Lösungen.

Chinhydronelektrode

Kordatzki, Taschenbuch d.prakt.pH-Messung, 1949, S.33-35, S.105-114; Dr.W.Kordatzki, D.R.P. 564468, 1930, Verf.z.Dauermess.d. Wasserstoffionenkonz.mittels Chinh. El; VAN DER MEULEN, Wilcoxon, Zeitschr.Chem.Techn., 1928, glatter Platindraht f.elektrometr.Titr.; C.C. COONS, Zeitschr.chem.Techn., 1932, S.368, Kontinuierl.pH-Messung m.Chinh.El.; Dr.G.ROEDER, D.R.P.816606, 1949, Chinhdr.El.; Dr.M.TREMEL, D.R.P. 462754, 1925, Vorricht.z.elektrometr.Maßanalyse;

Antimonelektrode

Dr. Ferdinand Daser, Dr. Willy Kordatzki, D.R.P. 859683, 1950, Meßgerät z.fortlaufenden pH-Mess.insbes.d.pH-Wertes von Lösungen; Dr. Ing. Friedr. Engel u. Dr. Ing. Siegfried Kießkalt, D.R.P. 722067, 1939 u. D.R.P. 746946, 1932, Verfahren u.Vorrichtung z.Reinigung v.Elektroden; Dr.F.Engel, D.R.P.701788, 1941, Metallelektrode.z.pH-Mess.; R.J.Karweil, D.R.P.747003, 1939,

Verfahren z.pH-Mess.reduzierend wirkender Flüssigkeiten mittels Antimonelektrode; Kordatzki, Taschenb.d.prakt.pH-Mess., 1949, S.116-129; Dr.P.Wulff u.Dr.W.Kordatzki, D.R.P. 606798, 1931 u.D.R.P. 626151, 1933, Vorrichtung z.Mess.d.Wasserstoffionenkonz.m.Hilfe v.Elektroden aus Antimon, Wolfram u.and., durch gelösten Sauerstoff oxydierb.Metallen od.deren Legierungen; Dr.P.Wulff u. Dr.W.Kordatzki, Zeitschr.Chem.Fabrik, 1935, S.254, Potentialbildung an d.Antimonelektrode.

Glaselektrode

Belcher, Zeitschr.Chem.Fabrik, 1933, S.319, Glaselektrode; Adam Frauendorf u. Dr.Ing.F.Engel, D.R.P. 834598, 1951, Verf.u. Vorrichtung z.Messung od. Regelung von Ionenkonz.; Dr.Walter Geffcken, D.R.P. 734051, 1937, Glasel.; Dr.Ing.Ullr.Hofmann u.Armin Wiss, D.R.P. 847363, 1951, Spannung erzeugende Elektrode; Kordatzki, Taschenbuch d.prakt.pH-Mess. 1949, S.130-157; Dr.W.Kordatzki, D.R.P. 750436, 1936, Glasel.zur Mess.d.Wasserstoffionenkonz.; Dr.W.Kordatzki, D.R.P. 629280, 1936, Glasel. z.Mess.d.Säuregrades; Dr.W.Kordatzki, D.R.P.713093, Membranel. z.Messung d.Wasserstoffionenkonz.; Morton u. Doran, Zeitschr.Chem.Fabrik, 1933, S.44, Elektrochem.pH-Mess.m.Glasel.; G.A. Ferley, Zeitschr.Chemie u.Ingenieurtechnik, 1950, S.377, Glasel. u.die für sie erforderl.Meßgeräte; Dr.Ing. Kurt Schwabe, D.R.P. 926166, 1942, Verfahren z.Mess.d.pH-Wertes v.Flüssigkeiten; Dr.K.Schwabe, D.R.P.926994, 1940, Verf.z.Messen d.pH-Wertes v.Flüssigkeiten; Sack, Dr.Werner, D.R.P.907714, 1951, Glasel.; Dr.K.Schwabe, D.R.P.748026, 1940, Verf.z.Best.d.pH-Wertes v.Flüssigkeiten;

Verbindungsmöglichkeiten zw. Meß- u. Bezugsflüssigkeit

- AMMON u. SOSNOWSKI, Zeitschr.Chem.Fabrik, 1936, S.73, KCl-Agar-Agar-Heber; Dr.Rer.nat. Heinz ENGELHARDT, D.R.P.882316, 1951, Meßkette z.Messung d.Ionenkonzentration insbes.d.pH-Wertes; Dr.Heinz GRÜSS, D.R.P.657896, 1934, Konzentrationselement, insbes.m.Kalomelel., für Konzentrationsmess.in Flüssigkeiten; G.W. IRVING, N.R. SMITH, Zeitschr.Chem.Fabrik, 1935, S.93, Salzbrücke für elektrometr.Mess.; Dr.Ing.F. LIENEWEG, D.R.P.693668, 1935, Anordn.z.Durchführung v.elektrometr.Messungen mit Hilfe v.Vergleichshalbelementen; Dr.Ernst MISLOWITZER, D.R.P.427327, 1925, Einrichtung z.Ionenmess., bestehend aus Ableitungs- u. Bezugslektrode u.den dazugehörigen Flüssigk.; Dr.Max TREMEL, D.R.P.399410, 1923 u.D.R.P.400273, 1924 u.D.R.P.423043, 1924 u. D.R.P.439175, 1925, Einrichtung z.elektrometr.Best.d.Acidity bzw.Alkalität (Wasserstoffionenkonz.) von Böden, Kohlearten, Wässern, Abwässern, chem. Lösungen usw.
2. K. Hickman und C. R. Sandford, Vollautomatischer Titrierapparat; Chem. Fabrik, 1933, S. 152;
 3. Kordatzki, Vorrichtung zur automatischen Durchführung elektrometrischer Titrationsen; D.R.P. 555990, 1929;
 4. Dr. U. Ehrhardt, Apparatur zur Ausführung elektrometrischer Maßanalysen, Zeitschr. Chem. Fabrik, 1936, S. 509;
 5. W. E. Shenk und F. Fenwick, Elektrometrische Titration, Zeitschr. f. Elektrochemie, 1935, Bd. II, S. 2552;
 6. Müller und Partridge, Application of the Photo - Electric Cell to Automatic Titrations; Industrial And Engineering Chemistry, 1928, Vol. 20, No. 4, S. 423-425;
 7. Lingane, Unterbrecher für automatische Titrationsen, Zeitschr. für Chemie und Ingenieurtechnik, 1949, S. 435;

8. Beckman Instruments, INC., Beckman Automatic Titrator, Bulletin 244 A, Februar 1954;
9. E. Furthmann, D.I.N.19226, Herausgeber VDI.1942,
10. Guido Wunsch, Das Regel - Einmaleins, Sonderdruck aus der "Askania - Warte" Nr.45 - 58, Jahrgang 1954/55;
11. Otto Schäfer, Grundlagen der selbsttätigen Regelung, Franzis-verlag, München 1953
12. Winfried Oppelt, Grundgesetze der Regelung, Wolfenbüttel - Hannover, 1947;
13. F. Lieneweg u. A. Naumann, Grundsätze und Verfahren der pH - Regelung, Zeitschrift Chem. Fabrik, 1940, S. 425 - 431, sowie Dr. Ing. F. Lieneweg, zur Regelgenauigkeit bei pH - Regelungen, Chem. Fabrik, 1942, S. 153 - 159;
14. Hartmann & Braun, AG, Rote Liste TT S. 1 - 15;
15. W. Kordatzki, Taschenbuch der praktischen pH - Messung, München 1949, S. 87;
16. James J. Lingane, Multipurpose Electroanalytical Serve Instrument, Analytical Chemistry, Vol. 21, No. 4, April 1949, S. 497 - 499
17. C. F. Jacobsen u. J. Leonis, A Recording Auto - Titrator, Compt.rend. Lab. Carlsberg, Ser. chim., Vol. 27, No. 14, S. 333 - 339
18. Beckman Instruments, INC., Applikationsbericht 7, Die Auto - Lite Battery Corporation löst das Problem der Entfernung der Abfallsprodukte durch automatische Kontrolle des pH - Wertes.
19. Askania - Werke AG., Der Askania - Strahlrohrregler, Druckschrift R 552 c
20. Askania - Werke AG, Temperaturregler "Thermolus", Druckschrift R 555 b
21. Hartman & Braun, Regelux 3, Angebotsblatt TT, 3000/955 W

L e b e n s l a u f

Am 27. November 1933 wurde ich in München geboren als Tochter des Arztehepaars Dr. Hugo Riffeser und Dr. Hertha Riffeser, geb. Schneller.

1940 kam ich in eine Münchner Volksschule.

1943 wurde ich nach Berg/Starnberg evakuiert. Von dort aus besuchte ich bis 1944 die Volksschule Aufkirchen und anschließend die Städtische Oberrealschule Starnberg.

1948 kehrte ich nach München zurück und besuchte die Klenze - Oberrealschule. Im Juli 1952 bestand ich hier die Reifeprüfung.

Im Anschluß an das Abitur begann ich das Medizinstudium in Montpellier/Frankreich. Nach einem Semester kehrte ich nach München zurück. Seither studiere ich an der Ludwig-Maximilians-Universität. Im Frühjahr 1955 bestand ich das Physikum.

Das Staatsexamen beendete ich am 19. Juli 1958.

Ich danke sehr Herrn Professor Dr. H. Niemer für das Thema zu dieser Arbeit und für die Übernahme des Referates, Herrn Professor Dr. A. Butenandt für die Übernahme des Correferates und Herrn Dr. E. Meyer für die zahlreichen Anregungen, die er mir hinsichtlich der Quellensuche und der Gestaltung der Arbeit gegeben hat.

Zu großem Dank bin ich auch noch Herrn Professor Dr. Scheibe vom Elektro - Physikalischen Institut der Technischen Hochschule München verpflichtet, der mich mit zahlreichen Literaturhinweisen unterstützte, sowie Herrn Dipl. Ing. H. Huber, der mir bei der Ausführung der Zeichnungen half.

Herzlichen Dank auch Fräulein Margrit Huber, die die etwas schwierige Reinschrift der Arbeit ausführte.

